

---

# **MASTERARBEIT**

---

Herr  
**Benjamin Gohl**

**Konstruktion eines sphäri-  
schen Couette-Experiments  
zum Studium magneto-  
hydrodynamischer  
Instabilitäten**

Mittweida, 2013

---

# **MASTERARBEIT**

---

## **Konstruktion eines sphärischen Couette-Experiments zum Studium magneto- hydrodynamischer Instabilitäten**

Autor:  
**Herr**

**Benjamin Gohl**

Studiengang:  
**Maschinenbau**

Seminargruppe:  
**MB11wK-M**

Erstprüfer:  
**Prof. Dr.-Ing. Uwe Mahn**

Zweitprüfer:  
**Dr. Frank Stefani**

Einreichung:  
**Mittweida, 16.12.2013**

Verteidigung/Bewertung:  
**Mittweida, 2014**

# **MASTERTHESIS**

---

## **Construction of a spherical Couette-experiment to study magneto-hydrodynamic instabilities**

author:

**Mr.**

**Benjamin Gohl**

course of studies:

**mechanical engineering**

seminar group:

**MB11wK-M**

first examiner:

**Prof. Dr.-Ing. Uwe Mahn**

second examiner:

**Dr. Frank Stefani**

submission:

**Mittweida, 16.12.2013**

defence/ evaluation:

**Mittweida, 2014**

## **Bibliografische Beschreibung:**

Gohl, Benjamin:

Konstruktion eines sphärischen Couette-Experiments zum Studium magneto-hydrodynamischer Instabilitäten. - 2013. - XVI, 80, LVIII S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau, Masterarbeit, 2013

## **Referat:**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der konstruktiven Auslegung und Umsetzung eines sphärischen Couette-Experiments. Das Augenmerk liegt dabei auf der Kombination der Baugruppen Versuchsbehälter und Gestell mit den bereits vorhandenen Antrieben und den Helmholtz-Spulen. Die Auslegung der Konstruktion erfolgte für verschiedene Entwicklungsstufen des Experiments. Eine wichtige Rolle spielten die angedachten Messsysteme, weshalb zunächst ein Vorversuch durchzuführen war. Für verschiedene Konstruktionselemente mussten Variantenvergleiche sowie Berechnungen durchgeführt werden. Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt dieser Arbeit war die Betreuung der Fertigung bis hin zum Aufbau. Für die Fertigung wurde ein kompletter Zeichnungssatz des konstruktiven Aufbaus erstellt.



# Inhalt

<b>Inhalt</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Index</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Vorstellung des Betriebes	1
1.2 Das Projekt „sphärisches Couette-Experiment“	1
1.2.1 Allgemeines	1
1.2.2 Theoretische Grundlagen	3
1.3 Aufgabenstellung	6
1.4 Motivation	7
1.5 Kapitelübersicht	7
<b>2 Bisheriger Stand des Projektes</b>	<b>9</b>
2.1 Allgemeines	9
2.2 Geplanter Aufbau	9
2.3 Messsysteme	11
2.3.1 Ultrasonic Doppler Velocimetry	11
2.3.2 Potentialmesssonden	11
2.4 Verwendete Materialien	12
2.4.1 Gallium-Indium-Zinn-Legierung	12
2.4.2 Polymethylmethacrylat	12
<b>3 Voruntersuchung</b>	<b>13</b>
3.1 Allgemeines	13
3.2 Sensor und Lager-Test	13
3.2.1 Versuchsaufbau	13

3.2.2	Versuchsdurchführung .....	16
3.2.3	Validierung der Messergebnisse .....	17
3.3	<i>Auswertung</i> .....	20
3.3.1	Optische Einschätzung .....	20
3.3.2	Auswertung der Messungen .....	21
3.3.2.1	Messpositionen P1-P3 .....	21
3.3.2.2	Messpositionen P4-P7 .....	22
3.3.3	Lager und Dichtung .....	24
3.3.4	Fazit .....	24
3.4	<i>Weiterentwicklung der Vorzugsvariante</i> .....	25
<b>4</b>	<b>Versuchsbehälter</b> .....	<b>27</b>
4.1	<i>Allgemeines</i> .....	27
4.2	<i>Anordnung der Messsysteme</i> .....	27
4.2.1	UDV-Sensoren .....	27
4.2.2	Potentialmesssonden .....	29
4.2.2.1	Anordnung der PMS .....	29
4.2.2.2	Entwicklung der PMS .....	30
4.3	<i>Auslegung der äußeren Sphäre</i> .....	34
4.3.1	Erster Berechnungsentwurf - Spannungen und Verschiebungen .....	35
4.3.2	Verschraubung und Abdichtung der beiden Halbschalen .....	41
4.3.3	Zentrierung der beiden Halbschalen .....	42
4.4	<i>Gestaltung des Abflusses</i> .....	44
4.5	<i>Auslegung Ausgleichsbehälter</i> .....	47
4.6	<i>Auslegung der inneren Sphäre</i> .....	49
4.6.1	Berechnung der Auftriebs- und benötigten Gewichtskräfte .....	50
4.6.2	Möglichkeiten zur Kombination Welle - innere Sphäre .....	51
4.6.2.1	Variante 1 - geteiltes Inlay und durchgängige Welle .....	51
4.6.2.2	Variante 2 - geteiltes Inlay und geteilte Welle .....	52
4.6.2.3	Variante 3 - kompaktes Inlay und durchgängige Welle .....	53
4.6.3	Ausarbeitung der Vorzugsvariante .....	53
4.7	<i>Lagerung der inneren Sphäre</i> .....	58
4.8	<i>Nachrechnung des Versuchsbehälters</i> .....	60
4.8.1	Nachrechnung der Belastung durch den hydrostatischen Druck .....	61
4.8.2	Nachrechnung der Belastung durch die innere Sphäre .....	62
4.9	<i>Fertigung des Versuchsbehälters</i> .....	64
<b>5</b>	<b>Justiereinheit</b> .....	<b>67</b>

Inhalt	III
5.1 <i>Allgemeines</i> .....	67
5.2 <i>Aufbau</i> .....	68
5.3 <i>Nachrechnung der Justiereinheit</i> .....	69
<b>6       Gestell</b> .....	<b>73</b>
6.1 <i>Allgemeines</i> .....	73
6.2 <i>Ausarbeitung des Gestells</i> .....	74
<b>7       Anleitung für Montage- und Befüllvorgang</b> .....	<b>77</b>
7.1 <i>Anleitung für den Montagevorgang</i> .....	77
7.2 <i>Anleitung für den Befüllvorgang</i> .....	78
<b>8       Fazit</b> .....	<b>79</b>
<b>Literatur</b> .....	<b>81</b>
<b>Anlagenverzeichnis</b> .....	<b>85</b>
<b>Anlagen, Teil A</b> .....	<b>I</b>
<b>Anlagen, Teil B</b> .....	<b>VII</b>
<b>Anlagen, Teil C</b> .....	<b>IX</b>
<b>Anlagen, Teil D</b> .....	<b>XV</b>
<b>Anlagen, Teil E</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Anlagen, Teil F</b> .....	<b>XXI</b>
<b>Anlagen, Teil G</b> .....	<b>XXV</b>
<b>Anlagen, Teil H</b> .....	<b>XXXI</b>
<b>Anlagen, Teil I</b> .....	<b>XXXVII</b>
<b>Anlagen, Teil J</b> .....	<b>XLIII</b>
<b>Anlagen, Teil K</b> .....	<b>XLVII</b>
<b>Anlagen, Teil L</b> .....	<b>LIII</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Taylor-Couette-System.....	3
Abbildung 1-2: Abhängigkeit des Strömungsverhaltens von $Re$ und $Ha$ bei $\eta=0,5$ .....	5
Abbildung 1-3: Auftretende Sekundärströmungsregime .....	5
Abbildung 2-1: Konzeptentwurf „sphärisches Couette-Experiment“ .....	9
Abbildung 2-2: Aufbau Versuchsbehälter .....	10
Abbildung 3-1: Versuchsbehälter.....	14
Abbildung 3-2: Schematischer Aufbau.....	14
Abbildung 3-3: Messpositionen .....	15
Abbildung 3-4: Definition des Koordinatensystems.....	19
Abbildung 3-5: Messergebnis Deckel 1 Position P1.....	21
Abbildung 3-6: Messergebnis Deckel 2 Position P1.....	22
Abbildung 3-7: Vergleich bei P6-60 U/min .....	23
Abbildung 3-8: Vergleich bei P6-100 U/min .....	24
Abbildung 3-9: Optimierte Sensorbefestigung .....	26
Abbildung 4-1: Anordnung der UDV-Sensoren an der oberen Halbschale.....	29
Abbildung 4-2: PMS - Variante 1 .....	30
Abbildung 4-3: PMS - Variante 2 .....	31
Abbildung 4-4: PMS - Variante 3 .....	31
Abbildung 4-5: Eingebaute PMS.....	34

Abbildung 4-6: Randbedingungen Behälter.....	37
Abbildung 4-7: Hydrostatischer Druck.....	37
Abbildung 4-8: Verschiebung in Z-Richtung .....	39
Abbildung 4-9: Von Mises Vergleichsspannung .....	40
Abbildung 4-10: Verschraubung und Abdichtung der äußeren Sphäre.....	42
Abbildung 4-11: Lagerhalterung im Abfluss.....	44
Abbildung 4-12: Querschnitt - Lagerhalterung und Deckel Abfluss.....	45
Abbildung 4-13: Rohrleitung.....	46
Abbildung 4-14: Variante 1 - innere Sphäre .....	52
Abbildung 4-15: Variante 2 - innere Sphäre .....	52
Abbildung 4-16: Variante 3 - innere Sphäre .....	53
Abbildung 4-17: Blei-Inlay .....	54
Abbildung 4-18: Zentrierung der PMMA-Halbschalen .....	55
Abbildung 4-19: Innere Sphäre .....	58
Abbildung 4-20: Querschnitt Deckel Ausgleichsbehälter .....	59
Abbildung 4-21: Querschnitt Überwurfmutter .....	59
Abbildung 4-22: Baugruppe obere Lagerung der Welle.....	60
Abbildung 4-23: Verschiebung in Z-Richtung in mm - Gewichtskraft innere Sphäre .....	64
Abbildung 4-24: Modell des kompletten Aufbaus des Versuchsbehälters.....	65
Abbildung 5-1: Rotationsproblem des Versuchsbehälters .....	67
Abbildung 5-2: Grundelement der Justiereinheit .....	68

Abbildungsverzeichnis	VII
Abbildung 5-3: Schnittansicht Justiereinheit .....	69
Abbildung 5-4: Justiereinheit - Randbedingungen .....	71
Abbildung 5-5: Justiereinheit - Vergleichsspannung .....	72
Abbildung 6-1: Gestell - erster Entwurf .....	73
Abbildung 6-2: Inneres Gestell .....	74
Abbildung 6-3: Äußeres Gestell.....	75
Abbildung 6-4: Modell des gesamten Versuchsaufbaus .....	76
Abbildung 8-1: Gefertigter Behälter .....	80
Abbildung 8-2: Innere Sphären.....	80

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Übersicht der Versuchsstadien .....	2
Tabelle 3-1: Definition der Messpositionen .....	15
Tabelle 3-2: Theoretisch ermittelte Werte für Wandung und Rückwandecho.....	16
Tabelle 4-1: Gegenüberstellung PMS-Varianten .....	32
Tabelle 4-2: Werkstoffkennwerte PMMA .....	35
Tabelle 4-3: Erster Berechnungsentwurf - Festlegungen und Randbedingungen .....	36
Tabelle 4-4: Erster Berechnungsentwurf - Spannungen und Verschiebungen .....	38
Tabelle 4-5: Zweiter Berechnungsentwurf - Spannungen und Verschiebungen.....	40
Tabelle 4-6: Zentriervarianten .....	43
Tabelle 4-7: vorhandene Volumina bei 20 °C .....	48
Tabelle 4-8: Wärmeausdehnungskoeffizienten.....	48
Tabelle 4-9: Kennwerte zur Berechnung der Welle.....	57
Tabelle 4-10: Geänderte bzw. zusätzliche Randbedingungen und Festlegungen.....	61
Tabelle 4-11: Spannungen und Verschiebungen am Versuchsbehälter.....	62
Tabelle 4-12: Spannungen und Verschiebungen - Gewichtskraft innere Sphäre .....	63
Tabelle 5-1: Werkstoffkennwerte CuZn39Pb2 .....	70
Tabelle 5-2: Berechnung Justiereinheit - Festlegungen und Randbedingungen .....	70
Tabelle 5-3: Spannungen und Verschiebungen an der Justiereinheit .....	71

## Abkürzungsverzeichnis

<b><i>a</i></b>	Kantenlänge eines gleichschenkligen Dreiecks in [mm]
<b><i>A</i></b>	Flächeninhalt in [mm <sup>2</sup> ]
<b>B</b>	magnetische Flussdichte in [T]
<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b><i>d</i></b>	Durchmesser in [mm]
<b><i>D und E</i></b>	Konstanten
<b>ESRF</b>	Europäische Synchrotron-Strahlungsquelle
<b><i>f</i></b>	Frequenz in [Hz]
<b><i>F</i></b>	auf tretende Kraft in [N]
<b><i>g</i></b>	Gravitationsbeschleunigung [9,81 m/s <sup>2</sup> ]
<b>GaInSn</b>	Gallium-Indium-Zinn-Legierung
<b><i>h</i></b>	Füllhöhe des Behälters in [mm]
<b>Ha</b>	Hartmann-Zahl
<b>HZDR</b>	Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e.V.
<b><i>K<sub>t</sub></i></b>	technologischer Größeneinflussfaktor
<b><i>J</i></b>	Trägheitsmoment in [kgm <sup>2</sup> ]
<b><i>m</i></b>	Masse in [kg]
<b>M</b>	azimutale Wellenzahl
<b>PMMA</b>	Polymethylmethacrylat
<b>PMS</b>	Potentialmesssonden
<b><i>r</i></b>	Abstand zur Mess-Achse in [mm]
<b><i>r<sub>M</sub></i></b>	Abstand des Punktes M zur Rotationsachse in [mm]



---

<b><i>R</i></b>	Radius in [mm]
<b>Re</b>	Reynolds-Zahl
<b><i>R<sub>e</sub></i></b>	Streckgrenze des Werkstoffes in $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
<b><i>R<sub>p</sub></i></b>	Dehngrenze des Werkstoffes in $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
<b><i>S</i></b>	Sicherheit
<b>SW</b>	Schlüsselweite
<b><i>t</i></b>	Zeit in [s]
<b><i>T</i></b>	Temperatur in [K]
<b><i>Tm</i></b>	Torsionsmoment in [Nm]
<b>UDV</b>	Ultraschall-Doppler-Velocimetry
<b>USB</b>	Universal-Serial-Bus
<b><i>V</i></b>	Geschwindigkeit in $\left[\frac{mm}{s}\right]$
<b><i><math>\dot{V}</math></i></b>	Volumenstrom in $\left[\frac{m^3}{s}\right]$
<b><i>Vol</i></b>	Volumen in [mm <sup>3</sup> ]
<b><i>W</i></b>	Widerstandmoment in [mm <sup>3</sup> ]
<b><i>x</i></b>	Laufvariable in X-Richtung in [mm]
<b><i>α</i></b>	Längenausdehnungskoeffizient von Feststoffen in [K <sup>-1</sup> ]
<b><i>γ</i></b>	Volumenausdehnungskoeffizient von Flüssigkeiten in [K <sup>-1</sup> ]
<b><i>η</i></b>	Radiusverhältnis
<b><i>μ</i></b>	dynamische Viskosität in $\left[\frac{kg}{ms}\right]$
<b><i>ν</i></b>	kinematische Viskosität in $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
<b><i>ρ</i></b>	Dichte in $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
<b><i>σ</i></b>	Normalspannung in $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$

---

$\tau$	Schubspannung in $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
$\varphi$	Verdrehwinkel in [rad]
$\psi$	elektrische Leitfähigkeit in $\left[\frac{1}{\Omega m}\right]$
$\Omega$	Winkelfrequenz in $[s^{-1}]$

# Index

<b>A</b>	Auftriebskraft
<b>Blei</b>	bezüglich des Werkstoffes der inneren Sphäre
<b>DR</b>	Querschnittfläche des Dichtraumes
<b>F</b>	bezüglich der zulässigen Spannungen gegen Fließen
<b>Fluid</b>	Fluid GalnSn
<b>G</b>	bezüglich des Gewichts
<b>Inlay</b>	bezüglich des Blei-Inlays
<b>krit</b>	kritisch
<b>klein/groß</b>	kleine/große innere Sphäre
<b>Kreis</b>	bezüglich eines Kreisquerschnitts
<b>M</b>	bezüglich des Punktes M
<b>min/max</b>	minimaler/maximaler Wert
<b>O-Ring</b>	O-Ring
<b>r</b>	radial bzw. den Radius betreffend
<b>Rohr</b>	Rohrleitung des Abflusses
<b>s</b>	Schnur eines O-Rings
<b>Scheibe</b>	Volumenscheiben zur Berechnung der Ausflusszeit
<b>Stahl</b>	bezüglich Werkstoff der Welle
<b>t</b>	Torsionsbelastung
<b>VB</b>	Versuchsbehälter
<b>Welle</b>	bezüglich der Welle
<b>zd</b>	Zug-Druck-Belastung
<b>1/2</b>	bezüglich der inneren/äußeren Sphäre

# 1 Einleitung

## 1.1 Vorstellung des Betriebes [HZDR2013]

Das Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf, ehemals Forschungszentrum Dresden-Rossendorf genannt, ist eine am Stadtrand Dresdens liegende naturwissenschaftliche Forschungseinrichtung. In acht Instituten befassen sich etwa 1000 Mitarbeiter (Stand 2012), davon 450 Wissenschaftler, 160 Doktoranden und 40 Auszubildende mit Grundlagen und Anwendungsforschung auf den Gebieten der Medizin, Physik, Chemie und Biologie. Der Fokus der zentralen Forschungsbereiche Energie, Gesundheit und Materie liegt dabei in aktuellen Themengebieten, wie zum Beispiel nukleare Entsorgung, Krebsforschung oder energieeffiziente Prozesse. Zur Umsetzung verschiedenster Projekte werden die einzelnen Institute durch die Zentralabteilung Forschungstechnik fachübergreifend bei der Entwicklung und Realisierung wissenschaftlich-technischer Lösungen unterstützt. Seit August 2011 entsteht in Kooperation mit der TU Bergakademie Freiberg ein weiteres Institut, das Institut für Ressourcentechnologie am Standort Freiberg. Am Standort Leipzig befinden sich die Institute für Ressourcentechnologie und radiopharmazeutische Krebsforschung. In Grenoble betreibt das HZDR am ESRF die Rossendorf-Beamline. Das HZDR ist durch die verschiedenen Großforschungsanlagen weltweit für andere Forschungsgruppen und industrielle Unternehmen interessant, da es externen Nutzern die Möglichkeit gibt, diese Anlagen zu nutzen. Das HZDR fungiert somit auch als Partner verschiedenster wissenschaftlicher Projekte und Kooperationen.

## 1.2 Das Projekt „sphärisches Couette-Experiment“

### 1.2.1 Allgemeines [SCES2013]

Das Hauptziel des Projektes besteht in der Untersuchung einer elektrisch leitfähigen Flüssigkeit hinsichtlich ihres Strömungsverhaltens in einem kugelförmigen Testbehälter. Das Experiment kann als Modifikation des klassischen Taylor-Couette-Experiments angesehen werden, bei welchem sich das Fluid zwischen zwei Zylindern befindet und durch den äußeren oder inneren Zylinder in Bewegung versetzt wird. Im sphärischen Couette-Experiment hingegen befindet sich das Fluid zwischen zwei coaxialen Sphären und kann von diesen angetrieben werden. Die durch die Rotation der beiden Sphären hervorgerufene Strömung kann zusätzlich durch ein Magnetfeld beeinflusst werden. Wichtige Kennziffern zur Beschreibung der beiden genannten Beeinflussungsmöglichkeiten sind dabei die Reynolds-Zahl ( $Re$ ) sowie die Hartmann-Zahl ( $Ha$ ). Das Strömungsverhalten des Fluides lässt sich durch verschiedene Wertepaarungen dieser beiden dimensionslosen Kenn-

ziffern in den Bereichen stabil und instabil variieren. Ein weiterer wichtiger Parameter ist das Radiusverhältnis  $\eta$  der inneren zur äußeren Sphäre. Dabei soll in einem späteren Versuchsstadium zwischen zwei verschiedenen Größen der inneren Sphäre variiert und somit das Verhältnis verändert werden können. Mittels verschiedener Sensoren wird das strömende Fluid hinsichtlich der auftretenden Geschwindigkeiten und Potentialunterschiede an vorher genau definierten Messpositionen analysiert. Mit den daraus resultierenden Messergebnissen soll das Verhalten der elektrisch leitfähigen Flüssigkeit, besonders bei einem Wechsel der Strömungsarten, genauer beschrieben werden können. Im ersten Versuchsstadium wird zunächst nur die innere Sphäre in Rotation versetzt. In späteren Versuchsstadien ist zusätzlich eine Rotation der äußeren Sphäre vorgesehen.

Bezeichnung	Merkmal
<b>V0</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Testlauf (Versuchsbehälter mit Wasser gefüllt)</li> <li>- große innere Sphäre wird verwendet</li> <li>- nur Rotation innere Sphäre</li> </ul>
<b>V1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- große innere Sphäre</li> <li>- nur Rotation der inneren Sphäre</li> </ul>
<b>V2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kleine innere Sphäre</li> <li>- nur Rotation der inneren Sphäre</li> </ul>
<b>V3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- große innere Sphäre</li> <li>- Rotation der inneren und äußeren Sphäre</li> </ul>
<b>V4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kleine innere Sphäre</li> <li>- Rotation der inneren und äußeren Sphäre</li> </ul>

**Tabelle 1-1: Übersicht der Versuchsstadien**

### 1.2.2 Theoretische Grundlagen [MFSS2000], [TEO2011], [NIMSC2009], [SLRC1923]

Als Couette-Strömung bezeichnet man eine zunächst laminare Strömung einer viskosen Flüssigkeit zwischen zwei sich zueinander relativ bewegenden unendlich langen und breiten Platten. Als Taylor-Couette-Strömung bezeichnet man die Strömung im Spalt zwischen zwei coaxialen rotierenden Zylindern (siehe (a) Abbildung 1-1). Durch die geschlossen Fläche der Zylinder kann das System in der Länge als nicht begrenzt, aber endlich angesehen werden.

Bei einem gegenüber dem Durchmesser sehr kleinen Spalt zwischen den beiden Zylindern, kann die Strömung als ebene Couette-Strömung angesehen werden. Dabei wird ein Zylinder als feststehend und der andere als bewegt betrachtet.

Erhöht man die Geschwindigkeit bis zu einem bestimmten Punkt verlässt man den stabilen Strömungsbereich. Es bilden sich zunächst sogenannte Taylorwirbel die sich in mehreren übereinander liegenden Rollen zwischen den beiden Zylindern um die Drehachse bewegen (siehe (b) Abbildung 1-1). Bei einer weiteren Erhöhung der Geschwindigkeit fangen diese Wirbelrollen zusätzlich zu schwingen an (siehe (c) Abbildung 1-1). Sei die Rotationsachse die Z-Achse und die X-Achse die Radiuskomponente, so werden die Strömungen um die Z-Achse als Primärströmungen angesehen und die sich im turbulenten Bereich ausbildenden Rollen in der XZ-Ebene als Sekundärströmungen.

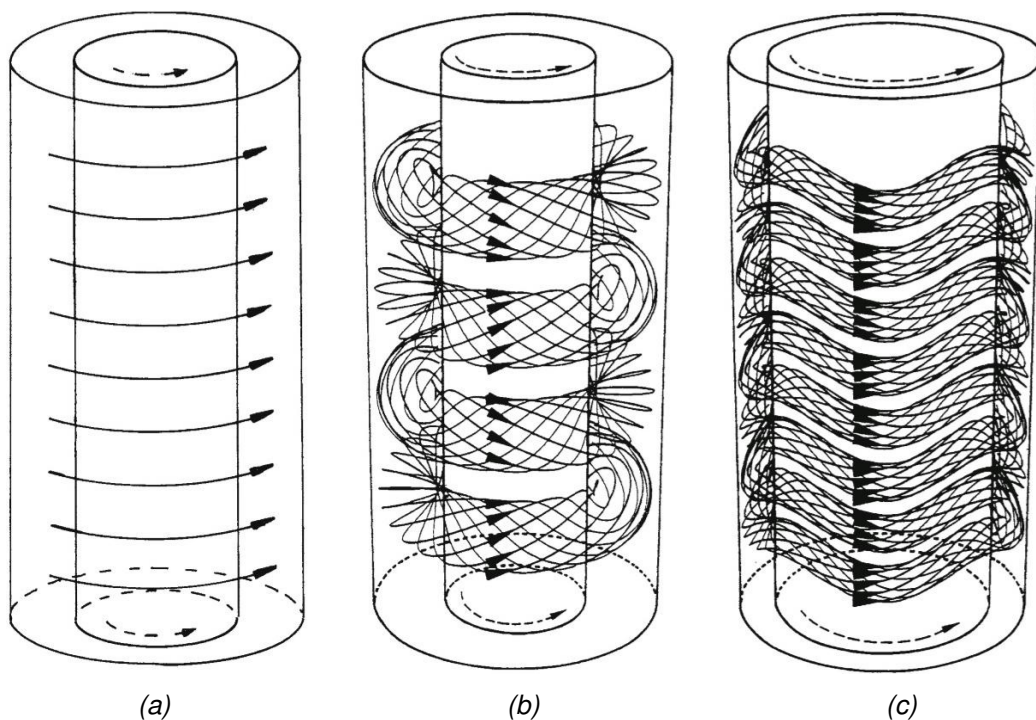


Abbildung 1-1: Taylor-Couette-System [TDYN2010]

Ein sphärisches Couette-Experiment besteht aus zwei koaxial gelagerten Sphären. Durch die Rotation der inneren Sphäre wird das elektrisch leitfähige Fluid durch viskose Kopplung in Bewegung versetzt. Zusätzlich kann das Fluid hier durch ein Magnetfeld beeinflusst werden. Wie bereits unter 1.2.1 erwähnt, spielen bei diesem Versuch  $Re$  und  $Ha$  eine bedeutende Rolle. Die Reynolds-Zahl beschreibt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften. Durch diese Zahl wird das Turbulenzverhalten weitgehend bestimmt. Ähnlich wie bei strömenden Flüssigkeiten in Rohren ist auch hier  $Re$  über die Geschwindigkeit beeinflussbar ( 1.1 ).

$$Re = \frac{\Omega_1 \times R_1^2}{\nu} \quad (1.1)$$

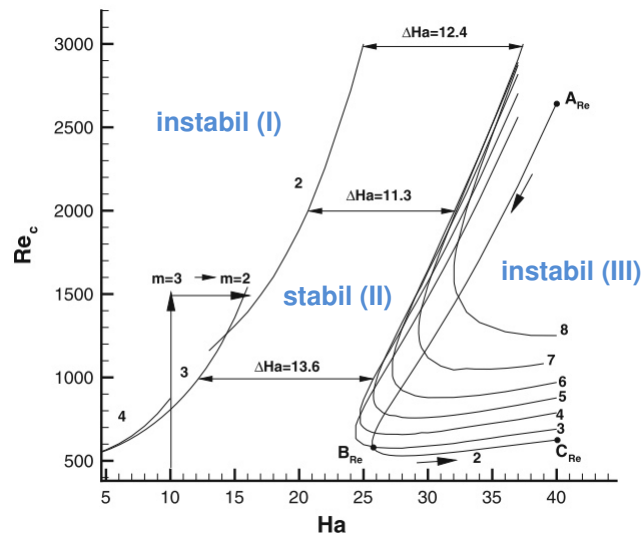
Durch das Anlegen eines Magnetfeldes werden zusätzlich zwischen den Teilchen der Flüssigkeit Kräfte hervorgerufen und somit das Strömungsverhalten beeinflusst.  $Ha$  gibt das Verhältnis zwischen magnetisch induzierten und viskosen Reibungskräften an und kann ebenfalls die Turbulenzeigenschaften beeinflussen. Nach Formel ( 1.2 ) ist die Hartmann-Zahl durch die magnetische Flussdichte  $B$  variierbar.

$$Ha = BR_1 \sqrt{\frac{\psi}{\rho\nu}} \quad (1.2)$$

$\psi$  ist die elektrische Leitfähigkeit. Das Strömungsverhalten lässt sich im Experiment somit durch verschiedene Wertepaarung dieser beiden Kennziffern über die Drehzahl  $\Omega_1$  und die an den Spulen angelegte Stromstärke  $I$  beeinflussen. Weiterhin müssen verschiedene Radiusverhältnisse  $\eta$  eingehalten werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

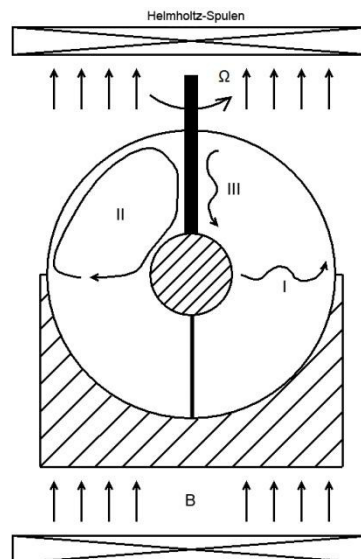
$$\eta = \frac{R_1}{R_2} \quad (1.3)$$

Durch Einstellen einer konstanten Drehzahl, somit des  $Re$ -Wertes, und Variation der magnetischen Flussdichte kann man die verschiedenen Bereiche instabiler und stabiler Strömung erreichen. In der folgenden Abbildung erkennt man die Abhängigkeit des jeweiligen Strömungsverhaltens von den ausgewählten  $Re$  und  $Ha$ -Werten bei  $\eta=0,5$ .



**Abbildung 1-2: Abhängigkeit des Strömungsverhaltens von  $Re$  und  $Ha$  [TEO2011 S.262]**

Dabei werden auch hier wieder Primärströmungen und Sekundärströmungen unterschieden, wobei sich die letzteren wiederum in drei verschiedene Regime unterteilen lassen. Diese sind in Abbildung 1-3 in ihrem Verhalten dargestellt und in Abbildung 1-2 dem jeweiligen Bereich zugeordnet.



**Abbildung 1-3: Auftretende Sekundärströmungsregime [SCES2013 S.2]**



Im Fall rotierender innerer Sphäre und stehender äußerer Sphäre besteht die Primärströmung aus einer differentiellen Rotation des Fluids sowie einer Meridionalströmung, die aus einem äquatorialen Jet und einer Rückströmung besteht. Im Parameterbereich (II) ist die Strömung stabil. Im Bereich (I) tritt eine Instabilität des radialen Jets auf, während im Bereich (III) die Rückströmung instabil wird. Beide Instabilitäten können in Form verschiedener Moden mit azimuthaler Wellenzahl  $M$  auftreten. Interessant ist vor allem der stabile Bereich zwischen den beiden Instabilitätsgebieten, der für mittlere  $Ha$ -Zahlen auftritt.

## 1.3 Aufgabenstellung

**Thema:** Konstruktion eines sphärischen Couette-Experiments zum Studium magneto-hydrodynamischer Instabilitäten

Auf der Grundlage einer Analyse zum Stand der Technik und Berücksichtigung der unter [PBBG2013] erarbeiteten Spezifikation des Experiments soll im Masterprojekt die Entwicklung, Auslegung und Umsetzung der Konstruktion des gesamten Versuchsaufbaus erfolgen. Das Augenmerk liegt auf der Kombination der Baugruppen Versuchsbehälter und Gestell mit den bereits vorhandenen Antrieben und Helmholtz-Spulen. Die Konstruktion soll für verschiedene Entwicklungsstufen des Experiments ausgelegt werden und somit eine Variation verschiedener Bauelemente ermöglichen. Dabei spielen besonders die angedachten Messsysteme eine Rolle, weshalb zunächst mittels des unter [PBBG2013] erarbeiteten Testbehälters Voruntersuchungen durchzuführen sind. Neben räumlichen Gegebenheiten sind folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- Kompensierung von Positionstoleranzen
- Temperaturschwankungen
- Besonderheiten der verwendeten Werkstoffe
  - Abstimmung der Fertigungsmöglichkeiten
  - Dichtheit des Systems
- Reproduzierbare Messergebnisse
- Sinnvolle und flexible Anordnungsmöglichkeit der Messsysteme

Für die genannten Punkte ist mittels verschiedener Variantenvergleiche eine Vorzugsvariante der Gesamtbaugruppe zu erarbeiten. Dabei sind gegebenenfalls verschiedene Berechnungen durchzuführen. Der umgesetzte konstruktive Aufbau des Experiments ist abschließend in ersten Tests auf seine Funktionstüchtigkeit zu überprüfen.

## 1.4 Motivation

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Bearbeitung der Masterarbeit, welche in Zusammenhang mit dem Kolloquium den Abschluss des Studiengangs Master of Engineering bildet. Dabei ist das Ziel, durch selbstständiges Arbeiten anhand einer vorgegebenen Thematik die im Bachelorstudiengang erlernten und im Masterstudium vertieften Kenntnisse anzuwenden.

Für die ingenieurtechnische Entwicklung und Umsetzung des gesamten Projektes „sphärisches Couette-Experiment“ ergab sich dabei in der Abteilung Magnetohydrodynamik des Instituts für Fluidodynamik am HZDR eine mögliche Aufgabenstellung für das Masterthema.

Diese Arbeit umfasst die komplette Entwicklung und Umsetzung des konstruktiven Aufbaus des Projektes über die Fertigung einzelner Baugruppen bis hin zu ersten Testversuchen. Nicht nur der konstruktive Bestandteil, sondern vielmehr die Verbindung verschiedenster Bereiche, die zur Lösung des Gesamtkonzeptes benötigt werden, als auch das eher spezielle Forschungsziel und der theoretische Hintergrund des Projektes geben der Aufgabenstellung eine interessante, aber auch durchaus umfangreiche Komponente.

Zwar stellt sich die Lösung der Problemstellung als auch die Einarbeitung in die spezielle Thematik als Herausforderung dar, doch ist sie durch die Betreuung des Projektes bis hin zum Aufbau und ersten Tests sowie den nötigen Voruntersuchungen durchaus hilfreich. Durch den praxisnahen Bezug können die im Studium behandelten Fachgebiete vertieft und weitere Erfahrungen hinsichtlich des ingenieurtechnischen Arbeitsablaufs gesammelt werden. Weitere wichtige Faktoren stellen die gesamte Betreuung und Dokumentation des Projektes sowie eine enge Zusammenarbeit mit dem auftraggebenden Forschungsbereich dar.

## 1.5 Kapitelübersicht

Die hier vorliegende Masterarbeit unterteilt sich in acht Kapitel.

Das erste Kapitel beschäftigte sich zunächst mit grundlegenden Aspekten der Masterarbeit, wie zum Beispiel der Erläuterung der theoretischen Grundlagen, auf denen der Versuchsaufbau basiert.

Anschließend wird im Kapitel zwei genauer auf das Projekt „sphärisches Couette-Experiment“ eingegangen. Dabei werden die verwendeten Medien und vorgesehenen Messsysteme genauer beleuchtet und der bisherige Stand samt geplantem Aufbau analysiert.

Im dritten Kapitel erfolgt die Durchführung und Auswertung der unter [SCES2013] angegebenen Voruntersuchungen, welche vor allen Dingen zur Ermittlung einer Vorzugsvariante der Sensorhalterung dienen sollen.

Kapitel vier behandelt die Baugruppe des Versuchsbehälters. Neben der konstruktiven Auslegung und Nachrechnung der möglichen Wandstärke des eigentlichen Behälters, werden für verschiedene Funktionselemente Variantenvergleiche durchgeführt und jeweils die gewählte Vorzugsvariante präzisiert. Ein Hauptbestandteil war dabei die Auslegung der inneren Sphäre. Abschließend wird die mögliche Fertigung diskutiert und der Aufbau an die Forderungen des Herstellers angepasst.

Kapitel fünf beschäftigt sich mit einer möglichen Justiereinheit zur Ausrichtung der Neigung und Verschiebung des Versuchsbehälters im Bezug auf den unteren Drehtisch. Dabei wurde wiederum eine Festigkeitsberechnung durchgeführt.

Danach wird im sechsten Kapitel der konstruktive Bereich dieser Arbeit durch die Auslegung des Gestells abgerundet und beendet.

Das siebte Kapitel beschäftigt sich zum einem mit dem Montagevorgang sowohl bei der Erstmontage des Versuchsaufbaus als auch mit anschließenden Montage- und Demontagevorgängen. Zum anderen wird der Vorgang der Behälterbefüllung erläutert.

Letztendlich werden im Kapitel acht die Ergebnisse der Bachelorarbeit zusammengefasst und es erfolgt ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen.

## 2 Bisheriger Stand des Projektes

### 2.1 Allgemeines

Zum Startzeitpunkt des Projektes war bekannt, welche Materialien und welche Messsysteme im Experiment zum Einsatz kommen werden. Weiterhin gab es einen Konzeptentwurf, wie der Versuchsaufbau aussehen soll. Dabei geht man davon aus, dass sich sowohl der Ablauf des Experiments als auch der Aufbau in verschiedenen Versuchsstadien ändern werden. Unter [PBBG2013] wurden in einer Spezifikation [SCES2013] relevante Systemparameter und Abmaße zusammengefasst. Des Weiteren wurden unter [PBBG2013] verschiedene Sensorhalterungen, für das unter 2.3.1 erläuterte Messsystem, erarbeitet. Diese sind an dem ebenfalls unter [PBBG2013] erarbeiteten Testbehälter zu untersuchen und eine geeignete Vorzugsvariante oder gegebenenfalls eine Weiterentwicklung einer Variante zu finden.

### 2.2 Geplanter Aufbau [SCES2013]

Der vorhandene Konzeptentwurf des konstruktiven Aufbaus beinhaltet lediglich die wesentlichen Komponenten (siehe Abbildung 2-1). Die Hauptbaugruppe unterteilt sich zunächst in vier Bestandteile. Die Grundlage stellt dabei das Gestell (1) dar.

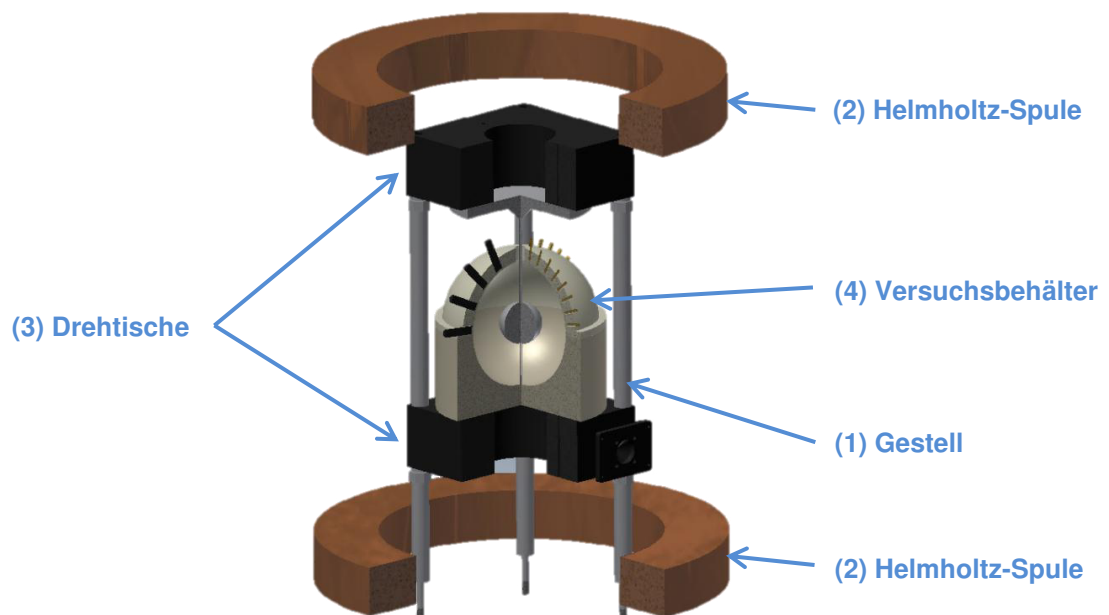
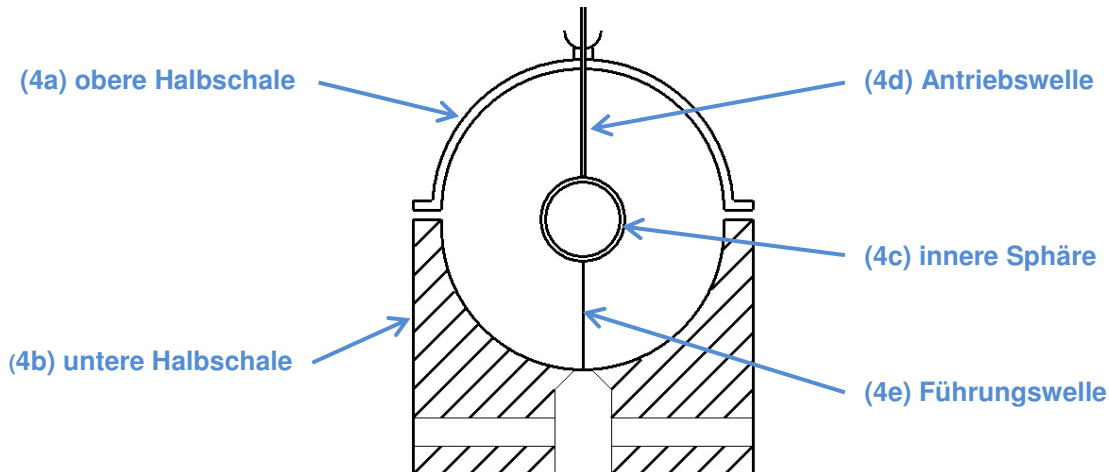


Abbildung 2-1: Konzeptentwurf „sphärisches Couette-Experiment“ [SCES2013 S.2]

Alle weiteren Bestandteile werden daran in ihren vorher definierten Positionen fixiert. Am oberen und unteren Ende des Gestells sind zwei Helmholtz-Spulen (2) zur Erzeugung der für das Experiment notwendigen magnetischen Flussdichte angebracht. Bei der Lagerung der Spulen ist darauf zu achten, dass sich diese während der Versuchsdurchführung erwärmen und somit ausdehnen. Dies könnte allerdings im schlechtesten Fall zum Verzug des Gestells und somit zur Veränderung der Lagebeziehungen aller weiteren Komponenten zueinander führen und die Versuchsergebnisse verfälschen. Deshalb sind bezüglich des Gestells verschiedene Lösungsvarianten zu erarbeiten.

Die beiden Drehtische (3) bilden die dritte Komponente des Aufbaus. Der obere Drehtisch dient zur Rotation einer inneren Sphäre und somit zur Anregung des im Behälter befindlichen Fluids. Durch den unteren Drehtisch soll in einem späteren Versuchsstadium die Rotation des gesamten Behälters möglich sein.

Der Versuchsbehälter (4) ist der zentrale Bestandteil des Experiments. Dieser untergliedert sich nochmals, wie in Abbildung 2-2 zu sehen, in fünf Komponenten. Er besteht aus einer inneren und einer äußeren Sphäre. Letztere unterteilt sich wiederum in eine obere Halbschale (4a) und eine untere (4b). Die innere Sphäre (4c) wird über die Antriebs- (4d) und Führungswelle (4e) coaxial zur äußeren Sphäre gelagert. Durch das im Behälter befindliche Fluid erfährt die innere Sphäre eine Auftriebskraft. Durch eine konstruktive Lösung sollte dieser entgegen gewirkt werden.



**Abbildung 2-2: Aufbau Versuchsbehälter [SCES2013 S.6]**

## 2.3 Messsysteme

Am Versuchsstand sind zwei Messsysteme vorgesehen. Beide dienen zur Analyse der Strömungsregime durch Messen der auftretenden Geschwindigkeitsverhältnisse im Behälter.

### 2.3.1 Ultrasonic Doppler Velocimetry [SIPR2013]

Ultrasonic Doppler Velocimetry (UDV) ist ein Ultraschall-Verfahren zur Geschwindigkeitsmessung besonders in undurchsichtigen Flüssigkeiten. Es basiert auf dem Dopplereffekt. Hierbei handelt es sich um ein Pulsed Wave Doppler-Verfahren, mit dem eine tiefenselektierte Geschwindigkeitsmessung möglich ist. Ein Wandler fungiert dabei als Sender und Empfänger gleichzeitig. Er sendet kurze periodisch aufeinanderfolgende Ultraschallwellenpakete aus. Der Empfänger detektiert die durch die Flüssigkeitsteilchen reflektierten Echos. Bedingt durch die Bewegungsvorgänge der Teilchen im Fluid kommt es zu einer Frequenzverschiebung der reflektierten Wellenpakete. Über die Änderung der Laufzeit der Echos lässt sich die Entfernung der reflektierenden Teilchen ermitteln. Zur Messung der unter 1.2.2 genannten Strömungsregime ist eine geeignete Verteilung der UDV-Sensoren auf der Oberfläche des Behälters zu erarbeiten. Die Befestigungsmöglichkeiten der Sensoren wurden bereits unter [PBBG2013] diskutiert. Unter Kapitel 3 erfolgt anschließend eine Beurteilung.

### 2.3.2 Potentialmesssonden

Eine weitere Variante zur Ermittlung der Geschwindigkeit der Strömung ist die Messung der elektrischen Potentiale. Dazu müssen die Sonden direkten Kontakt zum Fluid besitzen und sollten in einem gleichmäßig verteilten Netz angeordnet werden. Der grundlegende Effekt ist die Induktion der sich im Magnetfeld bewegendes leitfähigen Flüssigkeit. Die Differenz zweier gemessener Potentiale entspricht der elektrischen Spannung. Wertet man diese Spannungen zum Beispiel in meridionaler Richtung aus, erhält man Aufschluss über die Umfangsgeschwindigkeit. Variationen in azimuthaler Richtung geben Aufschluss über die verschiedenen Instabilitätsmoden. Das Aussehen der Sonden sowie die Befestigungsmöglichkeit und Anordnung am Behälter ist noch nicht bekannt. Ebenfalls ist noch zu klären, aus welchem Werkstoff die Potentialmesssonden bestehen müssen. Da im mV-Bereich gemessen wird, würden große Übergangswiderstände das Messergebnis unbrauchbar machen.

## 2.4 Verwendete Materialien

Für den Versuchsaufbau sind vorwiegend zwei Materialien relevant. Gallium-Indium-Zinn (GalInSn) dient dabei als Fluid. Der Versuchsbehälter soll aus Acrylglas (PMMA) bestehen. Weitere Komponenten der Konstruktion, wie zum Beispiel das Gestell, sollten dabei nicht aus Werkstoffen hergestellt werden, die das Magnetfeld beeinflussen könnten. Aluminium sollte aufgrund seiner Reaktionsfreudigkeit mit dem verwendeten Fluid ebenfalls nicht zum Einsatz kommen.

### 2.4.1 Gallium-Indium-Zinn-Legierung

GalInSn ist eine Metalllegierung, die bei Raumtemperatur flüssig ist. Durch ihre hohe Dichte sollte bei der Auslegung des Behälters besonders auf das auftretende Gewicht der Legierung geachtet werden. Weiterhin verfügt das Fluid über eine geringe Viskosität und hohe Fließfähigkeit, was wiederum bei der Abdichtung des Behälters zu beachten ist. Die wichtigste Eigenschaft ist allerdings die relativ hohe Leitfähigkeit. Es reagiert besonders stark mit Aluminium und löst dieses unter Freisetzung von Wärme auf. Da es an Luft schnell zu oxidieren beginnt, wird ein Schutzgas, in diesem Fall Argon, zur Verwendung kommen. Weiterhin besitzt es eine hohe Oberflächenspannung und somit einen schlechten Benetzungsgrad.

### 2.4.2 Polymethylmethacrylat

Polymethylmethacrylat (PMMA), eher unter dem Handelsnamen Acrylglas bekannt, hat sich in vorgehenden Versuchen mit dem verwendeten Fluid als geeignet erwiesen. Zum einen wird es durch das GalInSn nicht angegriffen und zum anderen breiten sich Schallwellen darin nahezu mit der gleichen Schallgeschwindigkeit aus wie im Fluid. Dies wiederum ist besonders wichtig für die Messung mittels UDV-Sensoren, da ein direkter Kontakt mit dem GalInSn nur mit hohem Aufwand realisierbar wäre. Während der Versuchsdurchführung sind nicht alle am Behälter vorgesehenen Messplätze mit Sensoren besetzt und diese sollen ständig in ihrer Position geändert werden können. Deshalb müssten bei einem direkten Kontakt alle nicht belegten Messplätze abgedichtet und bei einem Wechsel der Messposition zunächst immer der Behälter entleert werden. Die Potentialmesssonden (PMS) dagegen müssen zwar in direktem Kontakt mit dem Fluid stehen, allerdings sind während der Versuchsdurchführung alle Messplätze belegt. Gewechselt werden diese PMS lediglich aufgrund von Verschleißerscheinungen. Dies geschieht aber nicht bei einer Versuchsdurchführung, sondern eher während der Wartung. PMMA lässt sich sehr gut durch spanabhebende Verfahren bearbeiten und kann auch durch Kleben verbunden werden. Nachteilig ist aber die nur bedingte Schlag- und Bruchfestigkeit. Ebenso ist der Verschleiß von eingebrachten Gewinden sehr hoch, weshalb unter [PBBG2013] bereits der Lösungsvorschlag, diesem mittels Gewindeeinsätzen entgegenzuwirken, erarbeitet wurde.

## 3 Voruntersuchung

### 3.1 Allgemeines

Mit dem Testbehälter sollen die ebenfalls unter [PBBG2013] erarbeiteten Sensorhalterungsvarianten auf ihre Verwendbarkeit am eigentlichen Versuchsbehälter des Experiments überprüft werden. Dabei ist der Einfluss der gekrümmten Übergangsflächen zwischen PMMA und GaInSn sowie der Oberflächenqualität und vorhandenen Wandstärke auf das Signal zu beurteilen. Dies muss zwingend vor der Fertigung der beiden Halbschalen geschehen, da die gefundene Vorzugsvariante Einfluss auf die Gestaltung der Messplätze der UDV-Sensoren hat und nachträglich nicht mehr verändert werden kann. Weiterhin sind die ausgewählten Kunststofflager und Wellendichtringe auf ihre Tauglichkeit zu überprüfen.

### 3.2 Sensor und Lager-Test

#### 3.2.1 Versuchsaufbau

Der Testbehälter besteht aus PMMA und wird ebenfalls mit GaInSn befüllt. Unter [PBBG2013] wurden drei verschiedene Sensorbefestigungsvarianten erarbeitet. Als Antrieb der Welle dient ein Motor (QBL4208-41-04-006) der Firma TRINAMC. Über das Regler-Modul TMCM-1640 wird der Motor mit Spannung versorgt. Mittels der dazugehörigen Software TMCL-IDE kann das per USB-Kabel mit einem Computer verbundene Regler-Modul angesprochen und somit der Motor gesteuert werden. Mit der Software UDOP3010 wird über das ebenfalls per USB verbundene Geschwindigkeitsmessgerät DOP3010 der Firma Signal-Processing der Wandler TR0410SS gesteuert und ausgewertet. In der Software lassen sich die gemessenen Geschwindigkeiten und Echos in Abhängigkeit der Tiefe grafisch darstellen. Vorab sind dazu verschiedene Betriebsparameter, wie zum Beispiel die Schallgeschwindigkeit der verwendeten Medien, einzutragen. Abbildung 3-1 zeigt das 3d-Modell des Testbehälter im Vergleich zur montierten Baugruppe samt Motoreinheit. In Abbildung 3-2 ist der Aufbau nochmals schematisch dargestellt.



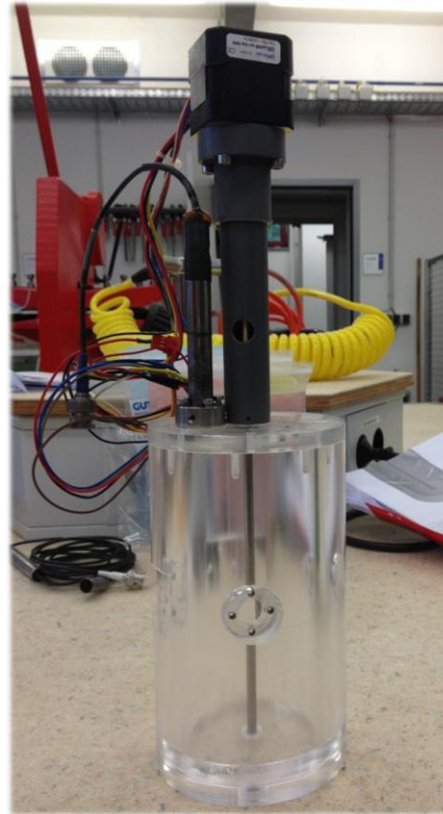
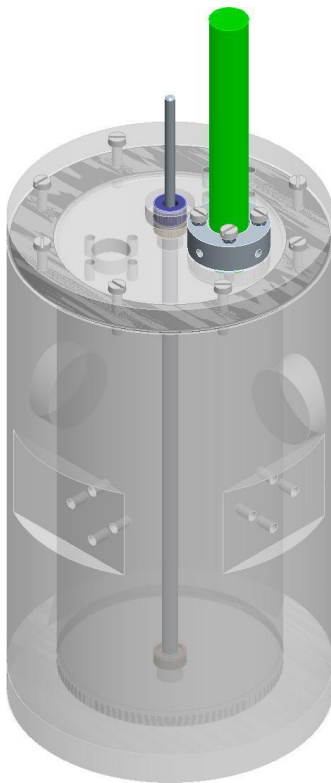


Abbildung 3-1: Versuchsbehälter

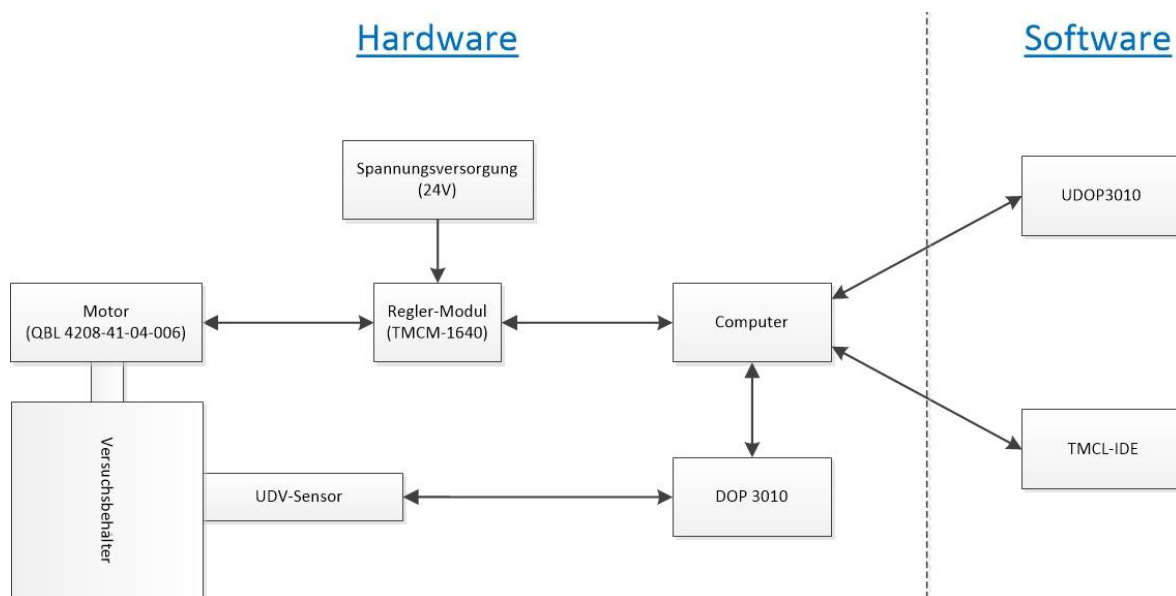


Abbildung 3-2: Schematischer Aufbau

Der Testbehälter besitzt sieben verschiedene Messpositionen, die mit P1-P7 bezeichnet werden. Diese sind in Abbildung 3-3 zu sehen und in Tabelle 3-1 nochmals kurz erläutert.

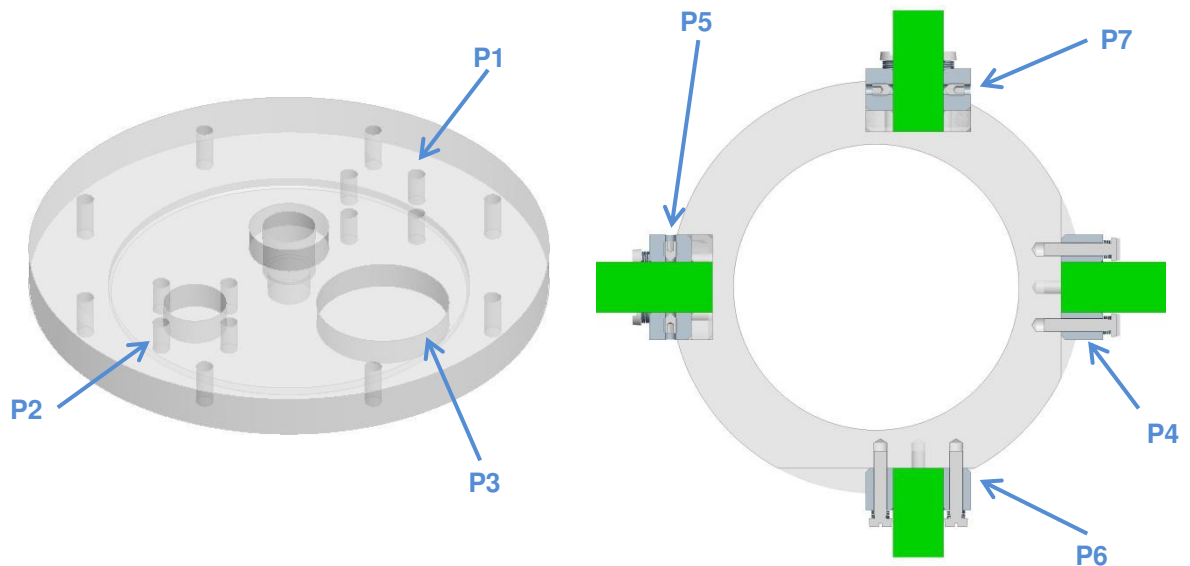


Abbildung 3-3: Messpositionen

Bezeichnung	Position	Variante	Merkmal
<b>P1</b>	Deckel	Variante 1	- Entlang der Rotationsachse
<b>P2</b>	Deckel	Variante 2	- Entlang der Rotationsachse
<b>P3</b>	Deckel	Variante 3	- Entlang der Rotationsachse
<b>P4</b>	Behälterwand	Variante 1	- Radial mit Blick auf Antriebsachse
<b>P5</b>	Behälterwand	Variante 3	- Radial mit Blick auf Antriebsachse
<b>P6</b>	Behälterwand	Variante 1	- 90° um Antriebsachse versetzt zu P4 - 10 mm außermittig
<b>P7</b>	Behälterwand	Variante 3	- 90° um Antriebsachse versetzt zu P5 - 10 mm außermittig

Tabelle 3-1: Definition der Messpositionen

### 3.2.2 Versuchsdurchführung

Bevor der Testbehälter mit GaInSn befüllt werden kann, müssen zunächst die später in Kontakt stehenden Flächen des Testbehälters auf Grund des schlechten Benetzungsgrades mit GaInSn eingerieben werden. Dazu gehören ebenso die beiden unterschiedlich gefertigten Deckel. Der erste Deckel wurde konventionell gefertigt. Der zweite wurde extern mittels CNC-Fertigung hergestellt. Anschließend wird der Testbehälter mit dem Schutzgas Argon geflutet. Nach dem Befüllvorgang kann der Behälter mit dem Deckel und der dafür vorgesehenen Dichtung verschlossen werden. Als nächstes wird der Motor an der vorgesehenen Führung montiert. Die Verbindung Motor-Antriebswelle wird über eine Hohlwelle umgesetzt. Diese wird über den Wellenabsatz des Motors und die Antriebswelle geschoben und jeweils mit einem Gewindestift fixiert. Das Regler-Modul wird mit der Spannungsquelle, dem Motor und dem Computer verbunden. Nach Installation des Treibers und der benötigten Software ist der Motor funktionsbereit. Anschließend wird das DOP3010 mit dem Computer verbunden und die Software installiert. Der mit dem DOP3010 verbundene UDV-Sensor kann nun mit den Bauteilen der verschiedenen Befestigungsvarianten kombiniert und an den dafür vorgesehenen Messplätzen angebracht werden. Um eine gute Einkopplung des Signals zu gewährleisten, ist am Sensorkopf Ultraschallgel aufzutragen. In der Motor-Regelsoftware wird eine konstante Drehzahl eingestellt. Abschließend ist die Software UDOP auf den UDV-Sensor einzustellen. Danach können nacheinander Messungen an den Positionen P1-P7 durchgeführt werden. Dabei schaut man zunächst im Echo-Profil nach, ob das Rückwandecho an der erwarteten Stelle auftritt. Vorab ist noch die Wandung zwischen Sensor und GaInSn einzustellen. In Tabelle 3-2 sind die theoretisch ermittelten Werte dieser beiden Kennwerte aufgelistet.

Bezeichnung	Wandung [mm]		Echo [mm]		Merkmal
<b>P1</b>	10	10	148	145	- Deckel 1/Deckel 2
<b>P2</b>	5	1	148	145	- Deckel 1/Deckel 2
<b>P3</b>	5	1	148	145	- Deckel 1/Deckel 2
<b>P4</b>	10		31,5		- Echo durch Antriebswelle
<b>P5</b>	5		31,5		- Echo durch Antriebswelle
<b>P6</b>	10,5		65		
<b>P7</b>	4,5		65		

**Tabelle 3-2: Theoretisch ermittelte Werte für Wandung und Rückwandecho**

Treten im Diagramm Echos an den erwarteten Abständen auf, begutachtet man als nächstes das Geschwindigkeitsprofil. Tritt dabei ein starkes Rauschen oder Springen der Geschwindigkeitswerte auf, sind nochmals die gewählten Einstellungen zu überprüfen. Gegebenenfalls sollte auch die Befestigung des Sensors auf ihre richtige Montage überprüft werden. Ist dies nicht der Fall, kann das Ergebnis mittels eines Mittelwert-Filters weiter optimiert werden. Anderenfalls ist die Messung unbrauchbar. Dies kann unterschiedliche Gründe haben. Zum einen kann die Einkopplung des Signals durch eine unzureichende Oberflächenqualität der Messplätze oder die gekrümmten Flächen verschlechtert werden. Zum anderen wurden möglicherweise die mit GaInSn in Kontakt stehenden Flächen nicht hinreichend eingerieben, wodurch ebenfalls die Einkopplung verschlechtert wird. Weiterhin ist darauf zu achten, dass sich die im Behälter auftretende Strömung nicht im turbulenten Bereich befindet. Dies kann über die Reynolds-Zahl und somit über die Drehzahl des Motors reguliert werden. Abschließend sind die erhaltenen Ergebnisse miteinander zu vergleichen und den errechneten Werten gegenüber zustellen.

### 3.2.3 Validierung der Messergebnisse

Die nach 3.2.2 gemessenen Geschwindigkeiten an den Positionen P4-P7 sind mit theoretisch errechneten Werten zu vergleichen und zu beurteilen. Laut [SLRC1923] lässt sich die Geschwindigkeit  $V$  einer inkompressiblen viskosen und gleichmäßig strömenden Flüssigkeit zwischen zwei unendlich langen konzentrisch gelagerten rotierenden Zylindern mit den Radien  $R_1$  und  $R_2$  an einem beliebigen Punkt wie folgt ermitteln:

$$V = Dr + \frac{E}{r} \quad (3.1)$$

Dabei ist  $r$  der Abstand des Punktes zur Rotationsachse.  $R_1$  bezieht sich auf den Radius des inneren Zylinders,  $R_2$  auf den äußeren.  $D$  und  $E$  sind Konstanten, die mit den Winkelgeschwindigkeiten der beiden Zylinder über die in (3.2) und (3.3) dargestellten Beziehungen verbunden sind.

$$\Omega_1 = D + \frac{E}{R_1^2} \quad (3.2)$$

$$\Omega_2 = D + \frac{E}{R_2^2} \quad (3.3)$$

Da in diesem Versuch lediglich der innere Zylinder rotiert, wird  $\Omega_2 = 0$  gesetzt. Stellt man die Formel ( 3.3 ) nach  $B$  um und setzt diesen Ausdruck in ( 3.2 ) ein, erhält man für  $D$ :

$$D = \frac{\Omega_1}{\left(1 - \frac{R_2^2}{R_1^2}\right)} \quad (3.4)$$

Durch Einsetzen von  $D$  in ( 3.3 ) ergibt sich für  $E$ :

$$E = - \frac{\Omega_1 R_2^2}{\left(1 - \frac{R_2^2}{R_1^2}\right)} \quad (3.5)$$

Unter Verwendung der beiden Konstanten lässt sich  $V$  nun wie folgt berechnen:

$$V = \frac{\Omega_1 r}{\left(1 - \frac{R_2^2}{R_1^2}\right)} - \frac{\Omega_1 R_2^2}{\left(1 - \frac{R_2^2}{R_1^2}\right)} r \quad (3.6)$$

$\Omega_1$  ergibt sich aus der Frequenz  $f$ :

$$\Omega_1 = 2\pi f \quad (3.7)$$

Ergebnis ist eine Geschwindigkeit  $V$ , die auf einem Kreis, der durch den Radius  $r$  definiert wird, in tangentialer Richtung verläuft. Gemessen wird allerdings ein Geschwindigkeitsprofil entlang der Mess-Achse des UDV-Sensors. Der errechnete Wert entspricht der gemessenen Geschwindigkeit auf Höhe der Rotationsachse. Die Entfernung zum UDV-Sensor beträgt dabei 32,5 mm zuzüglich der jeweiligen Wandung. An diesem Punkt verläuft die Geschwindigkeit bei einem Abstand  $r=10$  mm genau entlang der Messachse. Es soll allerdings ein Geschwindigkeitsprofil erstellt und mit den Messungen verglichen werden. Dazu ist die errechnete Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Winkels  $\varphi$  zu zerlegen. In Abbildung 3-4 wird die Problematik nochmals verdeutlicht. Durch Festlegung eines Koordinatensystems lässt sich die Geschwindigkeit nun als Funktion  $V(\varphi)$  deklarieren.

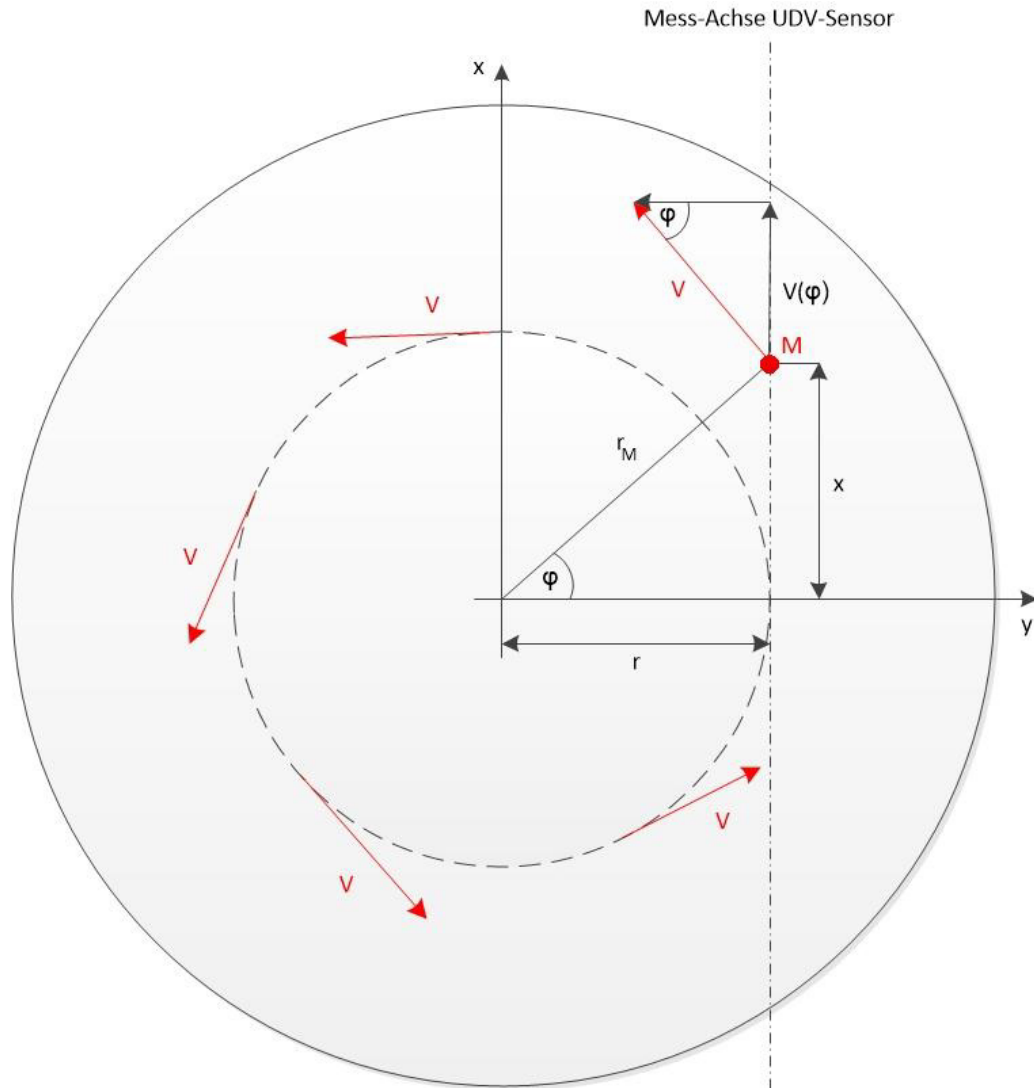


Abbildung 3-4: Definition des Koordinatensystems

Um  $V(\varphi)$  in einer bestimmten Tiefe berechnen zu können, muss zunächst  $\varphi$  definiert werden. M sei ein beliebiger Punkt entlang der Mess-Achse. Dieser besitzt in Y-Richtung den Abstand  $r$  und in X-Richtung den Abstand  $x$  zum Koordinatenursprung. Die direkte Verbindung vom Punkt M zum Koordinatenursprung wird als  $r_M$  bezeichnet. Durch  $r, x$  und  $r_M$  wird ein rechtwinkliges Dreieck aufgespannt. Da  $V$  immer senkrecht zu  $r_M$  steht, ergibt sich für die Geschwindigkeitskomponenten ebenfalls ein rechtwinkliges Dreieck, welches die gleichen Winkel aufweist. Somit lässt sich der gesuchte Winkel  $\varphi$  wie folgt berechnen:

$$\varphi = \arctan \frac{x}{r} \quad (3.8)$$

Die Variable  $x$  variiert im Bereich von 0 bis 65 mm. Dies entspricht dem Abstand vom Eintreten des Signals in das Medium GaInSn bis zum Rückwandecho an den Messpositionen P4-P7.

Die gesuchte Geschwindigkeit  $V(\varphi)$  kann nun nach ( 3.9 ) ermittelt werden.

$$V(\varphi) = V \cos \varphi \quad ( 3.9 )$$

Mit dieser Funktion lassen sich nun die Geschwindigkeiten entlang der Mess-Achse in Abhängigkeit von der gewählten Tiefe  $x$  berechnen und das gewünschte Geschwindigkeitsprofil erstellen.

### 3.3 Auswertung

#### 3.3.1 Optische Einschätzung

Zunächst sind die in Tabelle 3-1 genannten Messpositionen optisch zu bewerten. P1, P4 und P6 basieren auf der gleichen Befestigungsvariante. P2, P5 und P7 sind ebenfalls gleich. Mit Bezug auf den konventionell gefertigten Deckel ist die Oberflächenqualität, im Vergleich zu den Sacklöchern der anderen Positionen, etwas besser. Bei dem zweiten Deckel, der durch CNC-Fertigung hergestellt wurde, gibt es zwischen P1 bis P3 keine optischen Unterschiede. Auch die Sacklöcher besitzen hier eine sehr gute Oberflächenqualität. Im Vergleich zu den direkt am Behälter befindlichen Positionen ist die Oberflächenqualität am zweiten Deckel deutlich besser.

Bei der Montage wird deutlich, dass der Befestigungsring den UDV-Sensor zwar gut fixiert, aber dieser beim Verschrauben an der Messposition, bedingt durch die zu geringe Federkraft, höchstwahrscheinlich nicht stark genug gegen die Kontaktfläche gedrückt wird. Zumindest wird davon ausgegangen, dass dieser Fall bei einer längeren Belastung der Federn eintritt, besonders an den späteren Positionen am Behälter, bei denen durch die Gewichtskraft ein Kippmoment auftritt. Deshalb sollte die ausgewählte Vorzugsvariante diesbezüglich nochmals optimiert werden. Möglicherweise ist das Problem mit nur einer Feder, die eine größere Federkraft besitzt und am Befestigungsring an einem zentralen Punkt angreift, zu lösen. Weiterhin ist hier auffällig, dass die Befestigungsvariante 3 im Vergleich zu den beiden anderen platzsparender ist. Dieser Punkt sollte nicht außer Acht gelassen werden, da der verfügbare Platz am späteren Versuchsbehälter eher begrenzt ist.

### 3.3.2 Auswertung der Messungen

An den Positionen P1 bis P3 lassen sich nur die Profile des Echos und der Geschwindigkeit auf ihr Qualität untersuchen. Ein Vergleich mit errechneten Werten ist nur bei P4 bis P7 möglich. Es können allerdings die Messungen an den beiden Deckel gegenüber gestellt werden.

#### 3.3.2.1 Messpositionen P1-P3

Bei einer eingestellten Drehzahl von 60 U/min und unter Verwendung des ersten Deckels ergeben sich weder bei P1, P2 noch P3 brauchbare Ergebnisse. Lediglich bei P1 kann man ein leichtes Rückwandecho bei der erwarteten Tiefe von 148 mm deuten (siehe Abbildung 3-5). An den beiden anderen Positionen lässt sich das Echo des Bodens nur erahnen. Das Geschwindigkeits-Profil ist ebenso nicht aussagekräftig. Theoretisch sollte die Geschwindigkeit parallel zur Rotationsachse bei einem laminaren Strömungsverhalten des Fluids in jeder Messtiefe gegen null verlaufen. Hier tritt allerdings bei den Positionen P1 bis P3 ein starkes Rauschen auf. Aufgrund des schlechten Echos und des fehlerhaften Geschwindigkeits-Profils werden diese Messergebnisse als unbrauchbar angesehen.

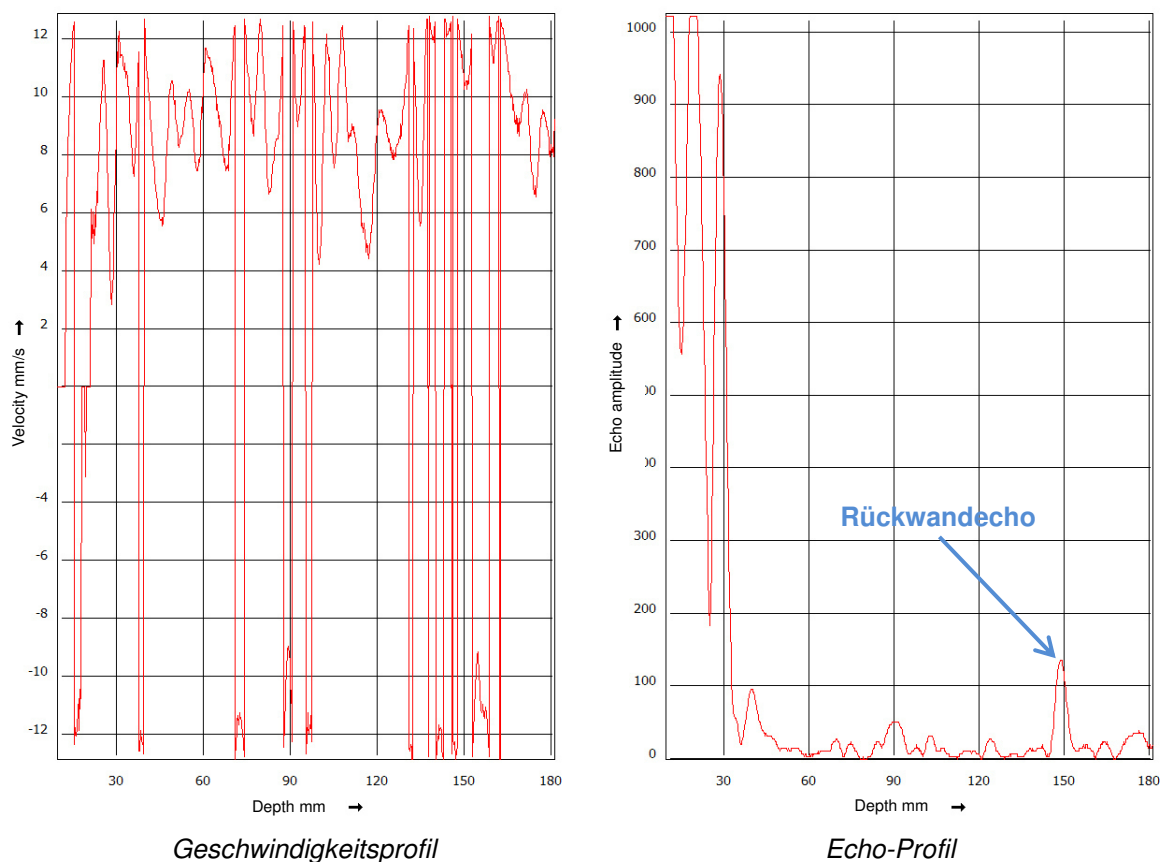
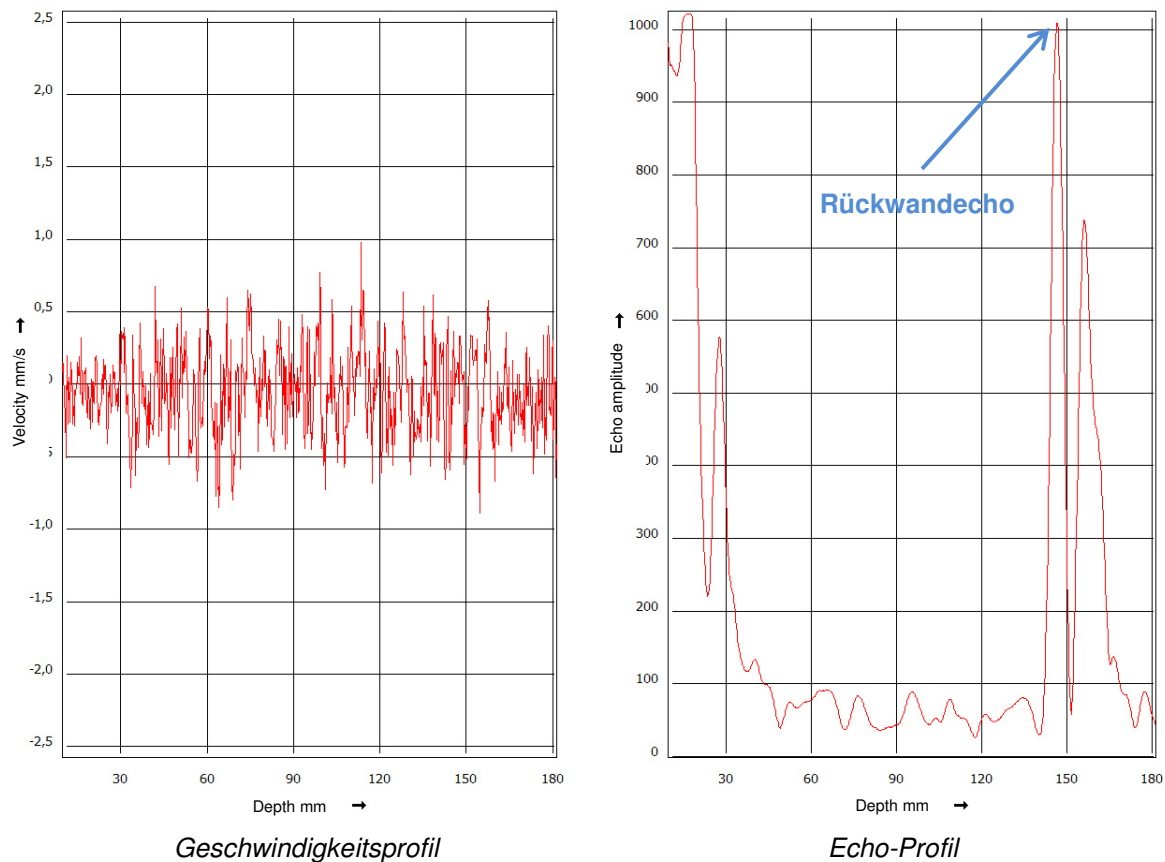


Abbildung 3-5: Messergebnis Deckel 1 Position P1



Ein anderes Bild ergibt sich bei der Montage des zweiten Deckels. Unter gleichen Bedingungen ergibt sich bei P1 ein besseres Rückwandecho. Bei den beiden anderen am Deckel befindlichen Messpositionen bildet sich das Rückwandecho ebenfalls deutlich stärker aus. Auch die Darstellung des Geschwindigkeits-Profiles erscheint nun an allen drei Positionen eher vernünftig. Zur Gegenüberstellung sind in Abbildung 3-6 die Messergebnisse der Position P3 am zweiten Deckel zu sehen. Dabei ist zu erkennen, dass sich im Geschwindigkeits-Profil nun die Werte eng um den Nullpunkt bewegen und das Rückwandecho auch deutlich stärker ausgebildet ist.



**Abbildung 3-6: Messergebnis Deckel 2 Position P1**

### 3.3.2.2 Messpositionen P4-P7

Die Positionen P4 bis P7 befinden sich direkt am Behälter. Die Messachsen verlaufen senkrecht zur Rotationsachse. Bei P4 und P5 sollten keine Geschwindigkeiten messbar sein. Das Rückwandecho wird durch die Rotationsachse hervorgerufen. Die eingestellte Drehzahl beträgt zunächst wieder 60 U/min. Das Rückwandecho tritt bei beiden Positionen wie erwartet auf. Allerdings ist das Echo bei P4, aufgrund der fertigungsbedingten

besseren Oberflächenqualität, stärker ausgeprägt. Bei P5 ist die Position des Rückwand-echos leicht verschoben. Wie erwartet treten bei beiden Positionen keine Geschwindigkeiten auf, beziehungsweise nur ein leichtes Schwanken um den Nullpunkt.

Für P6 und P7 gelten die unter Kapitel 3.2.3 gezeigten Formeln. An der überfrästen Messposition P6 ist gegenüber dem Sackloch an P7 wie schon bei P4 ein stärkeres Echo-Signal vorhanden. Deshalb erfolgt der Vergleich der errechneten Werte mit denen an der Position P6 gemessenen. Der Vergleich wurde bei den beiden Drehzahlen 60 U/min und 100 U/min durchgeführt. Unter Zuhilfenahme des Programmes Matlab R2007a konnte aus der ermittelten Funktion  $V(\varphi)$  (siehe Formel ( 3.9 )) das Geschwindigkeits-Profil (Vphi1), welches theoretisch entlang der Sensorachse auftreten soll, grafisch dargestellt werden. Mit dem Programm GetData Graph Digitizer wurden aus den gemessenen Geschwindigkeitsprofilen Wertepaare ausgelesen und in einer Excel-Tabelle abgelegt.

Danach konnte durch Einlesen der Excel-Tabelle in Matlab ebenfalls ein Graph aus den gemessenen Werten erstellt werden (Vphi2). Abschließend wurden die beiden Graphen in einem Diagramm, in Abhängigkeit der gewählten Drehzahl, dargestellt (siehe Abbildung 3-7 und Abbildung 3-8).

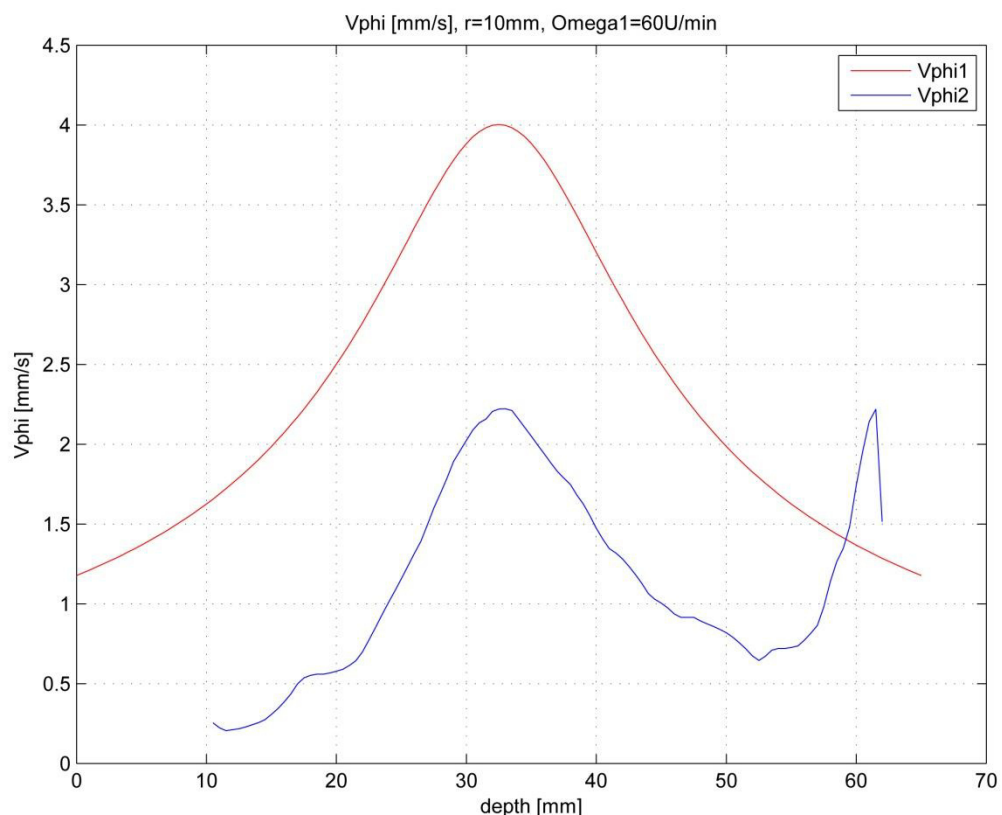
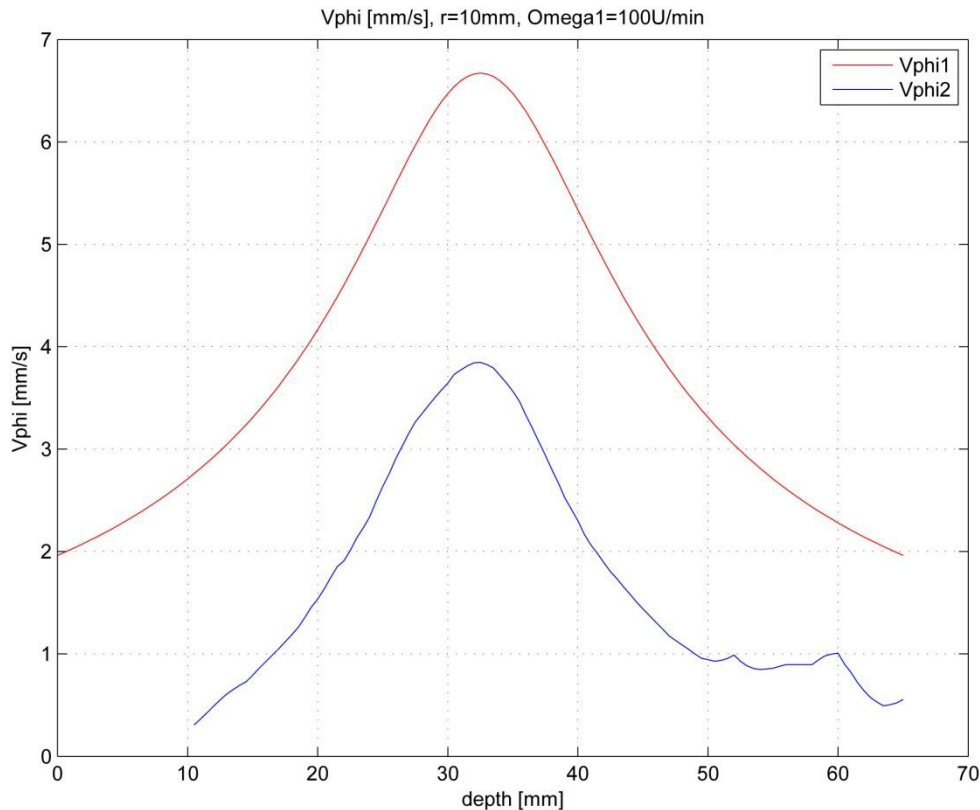


Abbildung 3-7: Vergleich bei P6-60 U/min



**Abbildung 3-8: Vergleich bei P6-100 U/min**

Bei beiden Drehzahlen verläuft der errechnete Graph nicht identisch zum Graph aus den ermittelten Messwerten, aber es lässt sich ein eindeutiger Trend erkennen. Die auftretenden Abweichungen sind unter den vorhandenen Bedingungen als vertretbar anzusehen.

### 3.3.3 Lager und Dichtung

Hinsichtlich der für das Experiment ausgewählten Wellendichtringe konnten auch bei mehreren Tests keine Auffälligkeiten gesehen werden. Deshalb wird davon ausgegangen, dass der gewählte Dichtring die deutlich langsamer rotierende Welle des Experiments ausreichend abdichtet. Auch bei den über längere Zeit mit GaInSn in Kontakt stehenden Lagern konnten keine Probleme festgestellt werden.

### 3.3.4 Fazit

Besonders die Messung am ersten und zweiten Deckel verdeutlichen, dass die Oberflächenqualität das Messergebnis erheblich beeinflussen kann. Deshalb muss diese bei der Herstellung des Versuchsbehälters so gut wie möglich sein. Messungen an P4 und P5 liefern die erwarteten Ergebnisse. An den Positionen P6 und P7 stimmen die gemessenen

Ergebnisse zwar nicht ganz mit den errechneten Werten überein, aber die Maxima treten bei beiden Graphen in der richtigen Messtiefe auf. Die Abweichungen können zum Teil auf die nicht eingehaltenen Randbedingungen, die theoretisch für Couette-Experimente gelten, zurückgeführt werden. Weiterhin wirkt sich, wie nun bekannt, die Qualität der Oberfläche auf das Signal aus. Das Signal an den Positionen P4-P7 wird durch die gekrümmte Innenfläche des Behälters gestreut. Aus diesen Gründen werden die Ergebnisse als relativ vernünftig angesehen. Die Messergebnisse jeder einzelnen Position befinden sich in den Anlagen Teil A. Weiterhin ist in den Anlagen Teil B der Quelltext, zur Darstellung der Graphen in Matlab am Beispiel P6 100 U/min zu sehen.

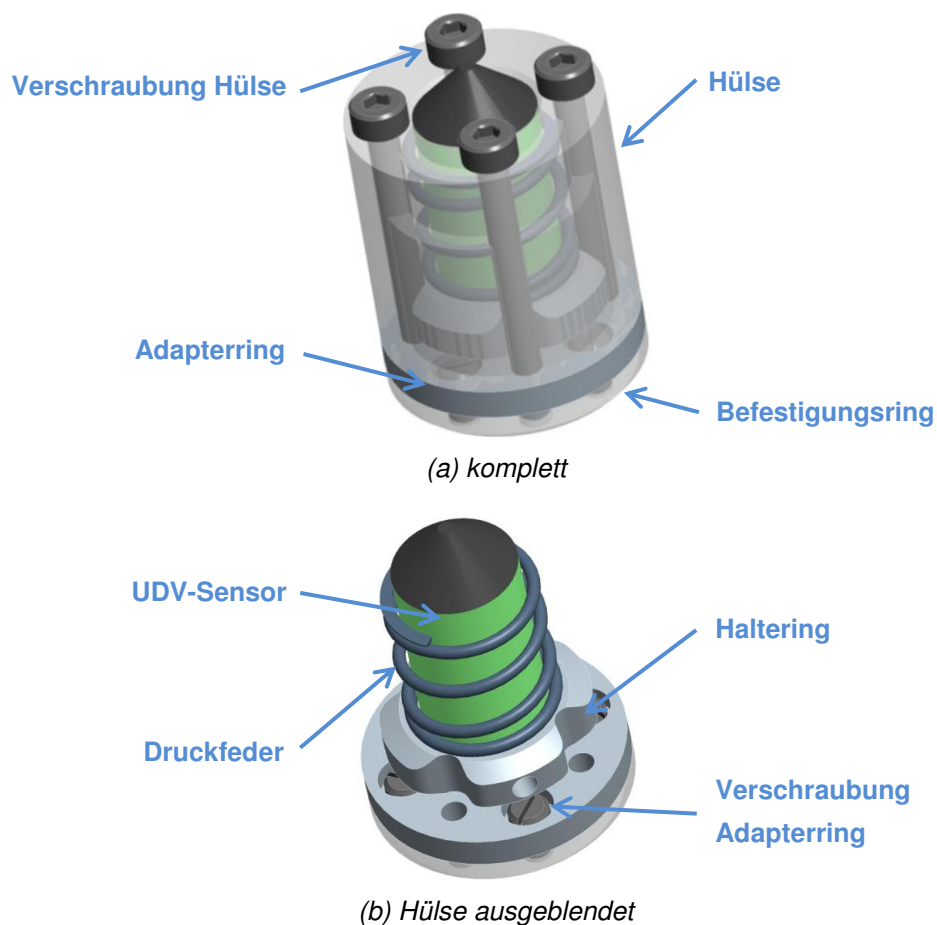
Da mit einer besseren Oberflächenqualität auch in den Sacklöchern, wie aus den Messungen am zweiten Deckel hervorgeht, gute Messergebnisse erzielbar sind, wird die dritte Befestigungsvariante als Vorzugsvariante angesehen. Weitere Beweggründe sind die geringere Wandstärke und der geringere Platzbedarf. Allerdings muss diese Vorzugsvariante auf Grund der bereits genannten Probleme nochmals optimiert werden. Dies geschieht im nachfolgenden Kapitel.

### 3.4 Weiterentwicklung der Vorzugsvariante

Zunächst musste überdacht werden, inwiefern die Vorzugsvariante optimiert werden kann, um die aufgetretenen Probleme zu beseitigen beziehungsweise ihnen vorzubeugen. Die Idee war dabei folgende. Man reduziert die Anzahl der Federn auf eine einzige, die allerdings an einem zentralen Angriffspunkt angreift und somit den UDV-Sensor ausreichend gegen die Kontaktfläche drückt. Zusätzlich sollte diese eine höhere Federkraft besitzen. Dazu wurde die Druckfeder VD 180M20 der Firma Gutekunst ausgewählt. Diese kann über den Sensor geschoben werden. Der nun als Haltering bezeichnete Befestigungsring fixiert den Sensor mittels zweier Gewindestifte, wird aber nicht mehr direkt an der Messposition verschraubt. Die Feder wirkt auf den Ring und drückt somit den Sensor gegen die Kontaktfläche. Allerdings ergeben sich nun zwei Probleme. Zum einen muss nun der Haltering samt Sensor geführt werden. Zum Anderen benötigt die Druckfeder einen Anschlag, um überhaupt eine Kraft auf den Haltering ausüben zu können. Dazu wurde eine Hülse mit Boden aus PMMA entworfen. Am Boden besitzt sie ein Durchgangsloch in der Größe des Sensordurchmessers, damit diese über den Sensor geschoben werden und das Anschlusskabel ordnungsgemäß weggeführt werden kann. Die Hülse wird anschließend mittels vier Schrauben am Messplatz befestigt. Um weiterhin die in die Sacklöcher eingeklebten PMMA-Ringe samt Gewindeeinsatz verwenden zu können, liegen die Positionen der Verschraubungen sehr eng neben der Druckfeder. Dies hat zur Folge, dass der Haltering nochmals angepasst werden muss. Er besitzt nun die Form eines Kleeblattes. Durch die Aussparungen wird die gewünschte Verschraubung ermöglicht und der Sensor weiterhin ordnungsgemäß in der Hülse geführt. Über die Lage des Halterings am Sensor kann der Federweg und somit die auftretende Kraft eingestellt werden.

Im Nachgang wurde entschieden, die eingeklebte Halterung nochmals anzupassen. Damit soll sichergestellt werden, dass bei einer mehrfachen Montage und Demontage der Sensorhalterung der eingeklebte PMMA-Ring nicht zu stark verschleißt womit im schlechtesten Fall der ganze Behälter unbrauchbar werden könnte. Dazu wird zunächst die Dicke des Ringes auf 3 mm verringert. Als weiteres Bauteil wird ein Adapterring am eingeklebten PMMA-Ring verschraubt. Dieser besitzt die gleichen geometrischen Abmaße, ist aber aus Edelstahl. Die Sensorbefestigung wird nun am Adapterring verschraubt, wodurch nicht ständig die Gewindeeinsätze im eingeklebten Ring durch Wechseln der Sensorpositionen belastet werden. Der Vorteil dabei ist, dass der Adapterring bei einem zu starken Verschleiß der Gewinde, wovon allerdings nicht ausgegangen wird, schnell nachzufertigen ist und ausgetauscht werden kann.

Der Aufbau dieser Befestigungsvariante wird nochmals in der folgenden Abbildung kurz erläutert: unter (a) im kompletten Zustand und unter (b) mit ausgeblendeter Hülse. Bei der Montage am Testbehälter konnten die durch die Anpassung erhofften Ergebnisse bestätigt werden. Der Sensor sitzt fest auf der Kontaktfläche und eine Verkippung ist auch nicht mehr möglich. Auch die Messergebnisse des Sensors entsprechen den Erwartungen.



**Abbildung 3-9: Optimierte Sensorbefestigung**

## 4 Versuchsbehälter

### 4.1 Allgemeines

Zum Startzeitpunkt der Masterarbeit war bekannt, dass die äußere Sphäre aus PMMA bestehen wird und einen Innendurchmesser von 180 mm besitzen soll. Wie groß die Wandstärke sein muss, war noch nicht bekannt, sollte aber ermittelt werden. Zunächst wird aber von 10 mm ausgegangen. Durch die Voruntersuchungen konnte eine Vorzugsvariante zur Befestigung der UDV-Sensoren ermittelt werden. Somit sind nun die notwendigen Abmaße der Messplätze bekannt. Mögliche Potentialmesssonden sind noch zu ermitteln, ebenso wie die genaue Anordnung beider Messsysteme. Bei der Verbindung beider Halbschalen miteinander sollte darauf geachtet werden, dass diese Verbindung ausreichend abgedichtet ist und eine ordnungsgemäße Zentrierung der beiden Halbschalen gewährleistet wird.

Weiterhin ist bekannt, dass im Versuchsstadium V2 und V4 eine kleinere innere Sphäre zum Einsatz kommen wird. Unter V1 und V3 besitzt die innere Sphäre einen Durchmesser von 90 mm, unter V2 und V4 einen Durchmesser von 60 mm. In Hinsicht auf die innere Sphäre ist zum einen noch zu klären, wie diese gelagert und mit dem Antrieb gekoppelt wird. Zum anderen muss noch untersucht werden, wie die durch das GalnSn vorhandenen Auftriebskräfte ausgeglichen werden können.

Am Behälter selbst ist eine Möglichkeit zur Befüllung und Entleerung vorzusehen. Auftretende Positionstoleranzen sollten in gewissem Maß durch geeignete Komponenten kompensiert werden können. Der untere Teil der äußeren Sphäre bzw. der Fuß des Versuchsbehälters ist die Schnittstelle zum Rest des Systems. Deshalb muss an diesem Punkt eine Anpassung der Geometrie und der Befestigungsmöglichkeiten an die des bereits vorhandenen Drehtisches erfolgen. Für den kompletten Versuchsaufbau wurde die Toleranzklasse ISO 2768-mK festgelegt. Für die beiden Sphären gilt allerdings ISO 2768-f. Besonders bei der Fertigung ist dies neben der bestmöglichen Rautiefe Rz zu beachten.

### 4.2 Anordnung der Messsysteme

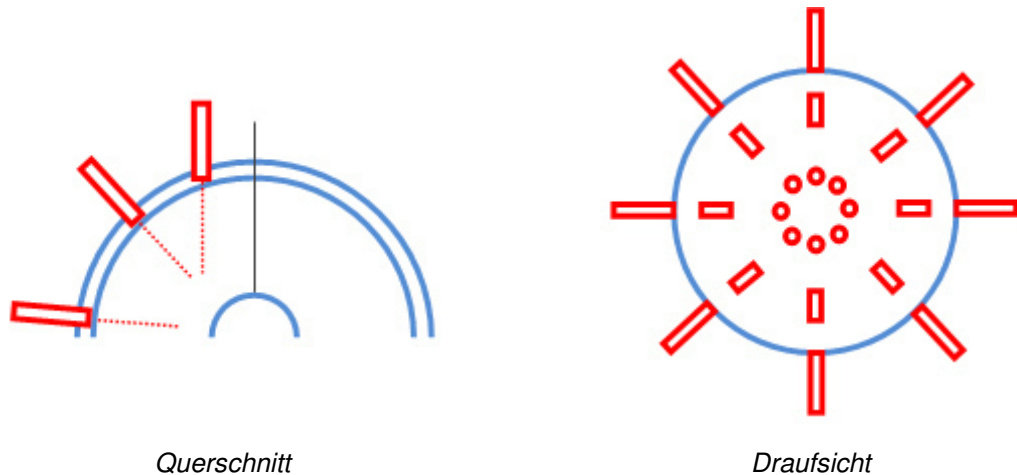
#### 4.2.1 UDV-Sensoren

Um nun die unter 1.2.2 erläuterten Strömungsregime untersuchen zu können, müssen die UDV-Sensoren sinnvoll auf der äußeren Sphäre angeordnet werden. Aus 3.4 gehen die notwendigen Maße des zur Befestigung vorgesehenen Sacklochs hervor. Es wird ein Durchmesser von 25 mm pro Messposition benötigt. Die Wandung sollte so gering wie

möglich gehalten werden, vorzugsweise 1 mm. Die Anzahl der Messplätze wird maßgeblich durch die geringe vorhandene Oberfläche des Versuchsbehälters und die Abmaße der Sensorhalterung beeinflusst. Zusätzlich wird die Anzahl der Messplätze an der unteren Halbschale der äußeren Sphäre durch den Fuß begrenzt. Darüber hinaus stehen am DOP3010 nur zehn Kanäle zur zeitgleichen Messung zur Verfügung.

Letztendlich wurde festgelegt, dass es an der oberen Halbschale drei Messpositionen entlang des Meridians geben wird, an denen jeweils sechs Messplätze in meridionaler Richtung verteilt werden. Die erste Position ermöglicht eine Messung parallel zur Rotationsachse. Die Messachse wird dabei exakt auf die Oberfläche der inneren Sphäre auf Höhe der Teilungsebene beider Halbschalen ausgerichtet. Da in den Versuchsstadien V2 und V4 eine kleinere innere Sphäre zum Einsatz kommen wird, ist dafür eine weitere obere Halbschale der äußeren Sphäre zu fertigen. Nur so kann eine ordnungsgemäße Ausrichtung der Messachse an dieser Position ermöglicht werden. Dabei ist zu beachten, dass für die Durchführung der Antriebswelle und einen Ausgleichsbehälter ausreichend Platz vorhanden ist. Durch den parallelen Verlauf entsteht eine stark gekrümmte Fläche, durch die das Signal gesendet und empfangen werden muss. Die Wandung sollte so dünn wie möglich gehalten werden, jedoch 1 mm an keiner Stelle des Sacklochs unterschreiten. Für die kleinere innere Sphäre liegt der Teilkreis der Sacklöcher bei 60 mm. An der anderen oberen Halbschale bei 90 mm. Die zweite Messposition zeigt radial auf die innere Sphäre. Der Neigungswinkel beträgt  $45^\circ$ . Die Krümmung der Fläche ist hier nicht so stark und die Wandstärke wird deshalb annähernd bei 1 mm liegen. Die dritte Position ist ungefähr auf die Mitte des Abstandes zwischen innerer und äußerer Sphäre auf Höhe der Teilungsebene ausgerichtet. Sie hat einen Abstand von 18,5 mm zur Teilungsebene, ca. 95 mm zur Rotationsachse und ist  $35^\circ$  geneigt. Ähnlich wie bei der ersten Position tritt hier eine stark gekrümmte Fläche auf. Um die Strömungsvorgänge von der inneren hin zur äußeren Sphäre analysieren zu können, müsste optimaler Weise die Messachse genau entlang der Teilungsebene verlaufen. Das ist allerdings nicht umsetzbar, weshalb zumindest versucht wird, so nah wie möglich zu liegen. Dabei ist zu beachten, dass belegte Messplätze nicht die Verbindung der beiden Halbschalen behindern. Insgesamt ergibt dies 18 Messplätze an der oberen Halbschale.

An der unteren Halbschale werden die beiden zuletzt genannten Positionen umgesetzt. Daraus ergeben sich zwölf Messpositionen. Insgesamt ergibt dies 30 UDV-Sensor-Messplätze am Versuchsbehälter. In Abbildung 4-1 ist die Anordnung der Sensoren am Beispiel der oberen Halbschale verdeutlicht.



**Abbildung 4-1: Anordnung der UDV-Sensoren an der oberen Halbschale**

## 4.2.2 Potentialmesssonden

### 4.2.2.1 Anordnung der PMS

Nach der Anordnung der UDV-Sensoren steht nun die restliche Oberfläche des Behälters zur Unterbringung der Potentialmesssonden zur Verfügung. Im Vergleich zu den Sensorhalterungen benötigen die PMS einen wesentlich geringeren Bauraum. Die Recherche nach einem kommerziell erwerblichen Bauteil, das als Messsonde fungieren könnte, war ohne Erfolg. Deshalb musste eine geeignete Variante ermittelt werden. Bei der Anordnung der PMS ist auf eine gleichmäßige Verteilung zu achten. In azimuthaler Richtung sollte der Abstand der Vergleichs-Messpunkte gleichgroß sein. Ebenso in Umfangsrichtung. Hierbei ergeben sich idealer Weise mehrere geschlossene Messkreise. Allerdings werden diese durch die Sacklöcher der UDV-Sensoren teilweise unterbrochen.

Für die obere Halbschale ergeben sich somit entlang des Meridians sechs Messposition. Bei der zweiten oberen Halbschale, die für die kleinere innere Sphäre benötigt wird, reduziert sich die Anzahl auf fünf. Alle Positionen verlaufen radial. Die erste Position ist um einen Winkel von  $15^\circ$  geneigt. Alle weiteren besitzen einen Abstand von  $12^\circ$  in meridionaler Richtung. Mit einem Winkel von  $15^\circ$  werden diese dann um die Rotationsachse verteilt. Damit ergeben sich für die erste obere Halbschale 90 Messplätze und für die zweite obere Halbschale 84. An der unteren Halbschale erfolgt die Verteilung in gleicher Art und Weise. Lediglich die Anzahl der Messpositionen wird aufgrund des Fußes auf vier reduziert. Somit ergeben sich für die untere Halbschale 78 Messplätze. Insgesamt ergibt dies eine Anzahl von 168 beziehungsweise 162 Messplätzen am gesamten Versuchsbehälter.

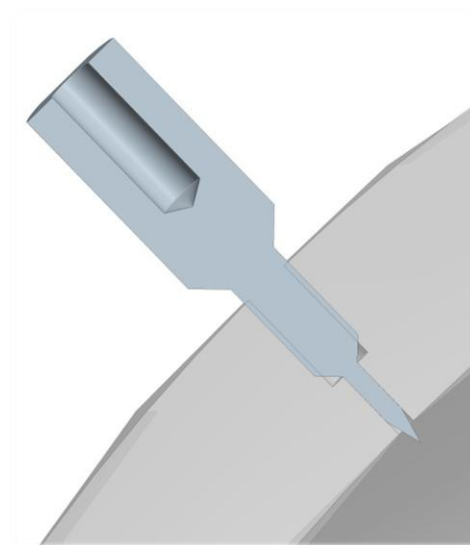


Die geometrischen Abmaße der Messpositionen waren allerdings noch nicht bekannt, da diese von der noch zu ermittelnden Variante der PMS abhängig sind. Dies geschieht im nachfolgenden Kapitel.

#### **4.2.2.2 Entwicklung der PMS**

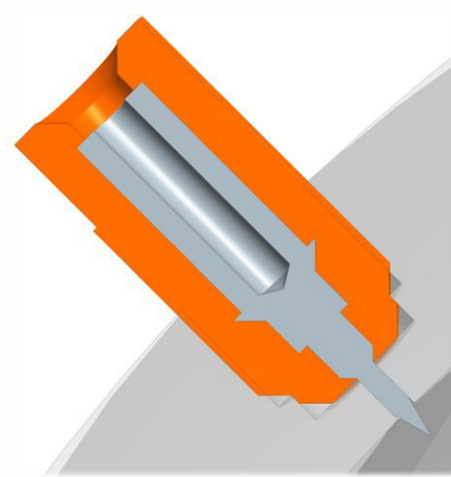
Die grundsätzliche Idee zur Gestaltung der PMS basiert auf der Form einer dünnen Nadel, die in direktem Kontakt zum Fluid stehen muss. Am anderen Ende wird ein Kabelanschluss zur Übertragung der gemessenen Potentiale angebracht. Da im mV-Bereich gemessen wird, ist bei der Auswahl des zu verwendenden Werkstoffes darauf zu achten, dass der Übergangswiderstand zwischen Fluid und PMS nicht zu groß ist. Weiterhin könnte es durch elektrochemische Prozesse zur Auflösung der Sonde kommen. In jedem Fall ist auf eine ordnungsgemäße Abdichtung der OMS zu achten. Letztendlich wurde noch festgelegt, dass die Spitze ca. 1 mm in den Versuchsbehälter hineinragen und die Verkabelung über 2 mm Federstecker erfolgen soll. In Hinsicht auf die Fertigungsmöglichkeiten ist zu beachten, dass mit dem Durchmesser von 1 mm keine großen Längen erzielt werden können, der Absatz auf einen anderen Durchmesser allerdings auch nicht zu groß sein darf. An den PMS muss aber eine Bohrung vom Durchmesser 2 mm als Buchse für den Federstecker fungieren. Es gab nun drei verschiedene Ideen zur Umsetzung der Problematik.

Variante 1 (siehe Abbildung 4-2) soll mit einem Gewinde M3 am Versuchsbehälter verschraubt und zusätzlich verklebt werden, um die nötige Abdichtung zu realisieren. Die Sonde wird zunächst für das Gewinde auf den Durchmesser 3 mm abgesetzt, danach nochmals auf einen größeren Durchmesser, um für die Bohrung des Federsteckers eine ausreichende Wandung zu besitzen.



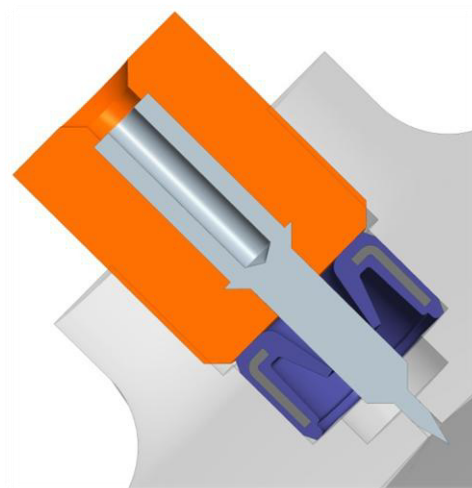
**Abbildung 4-2: PMS - Variante 1**

In Variante 2 (siehe Abbildung 4-3) wird die Sonde mehrfach abgesetzt und anschließend mit Kunststoff vergossen. Dadurch erhält die PMS einen Anschlag, womit die Tiefe der Messspitze genau definiert ist. Das Gewinde zur Befestigung befindet sich an der Kunststoffummantelung. Über einen O-Ring wird die Sonde abgedichtet. Zusätzlich wird die PMS durch die Ummantelung vor Korrosion geschützt.



**Abbildung 4-3: PMS - Variante 2**

Die letzte Variante (siehe Abbildung 4-4) ist im Grunde genommen eine Abwandlung der zweiten. Die Sonde wird zunächst auf 3 mm abgesetzt und durch einen Wellendichtring abgedichtet. Dadurch erhöht sich der benötigte Bauraum deutlich.



**Abbildung 4-4: PMS - Variante 3**

Der restliche Teil der Sonde wird wie in Variante 2 mit Kunststoff vergossen. Daran befindet sich ebenfalls das Gewinde zur Befestigung. Über den Wellendichtring und die Ummantelung besitzt die PMS wiederum einen Anschlag.

In der folgenden Tabelle wurden die Vor- und Nachteile der Varianten gegenübergestellt.

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
<b>Fertigungsaufwand</b>	+	-	-
<b>Arbeitsschritte am Behälter</b>	+	-	--
<b>Geringer Bauraum</b>	++	+	--
<b>Hohlraum</b>	++	+	--
<b>Werkstoff</b>	+	-	-
<b>Montage</b>	0	+	+
<b>Demontage</b>	--	++	++
<b>Abdichtung</b>	++	++	+
<b>Schutz vor Korrosion</b>	-	++	++
<b>Kosten</b>	+	0	-
<b>Ergebnis</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>-3</b>

**Tabelle 4-1: Gegenüberstellung PMS-Varianten**

Aus Tabelle 4-1 geht Variante 1 knapp als Vorzugsvariante hervor. Allerdings sollten die Punkte Korrosionsschutz und Demontage nachgebessert werden. Dazu werden die PMS zusätzlich beschichtet. Um einen Wechsel im Falle eines Defektes durchführen zu können, erfolgt die Abdichtung nun über einen O-Ring der Firma Hansaflex aus [HFD2013]. Die PMS wird nicht eingeklebt. Über eine Scheibe wird der O-Ring an die Dichtfläche des Behälters gedrückt und dadurch gleichzeitig eine genaue Tiefe der Spitze definiert. Die Scheibe dient somit als Anschlag. Am äußeren Ende verfügt die Sonde über eine Einkerbung zur Erleichterung der Montage beziehungsweise Demontage mittels Schraubenzieher.

Damit eine ordnungsgemäße Abdichtung gewährleistet werden kann, muss der Füllgrad laut [VATC2010] zwischen 79 und 91 % liegen. Ausgewählt wurde der O-Ring OR3-1 mit einem Innendurchmesser von 3 mm und einem Schnurdurchmesser  $d_s$  von 1 mm.

Durch die Potentialmesssonde, die Scheibe und die Fase am Behälter wird ein gleichschenkliges Dreieck aufgespannt. Dies kann als Querschnittfläche des Dichtraumes angesehen werden. Zunächst wurde aber die Querschnittfläche der Dichtung berechnet:

$$A_{O-Ring} = \frac{\pi}{4} d_s^2 \quad (4.1)$$

Daraus ergibt sich eine Fläche  $A_{O-Ring}$  von 0,7853 mm<sup>2</sup>. Setzt man nun diesen Flächeninhalt einmal mit den 79 % und einmal mit den 91 % gleich, erhält man die Spanne, in der sich der Flächeninhalt des Querschnitts des Dichtraumes  $A_{DR}$  befinden sollte.

$$\frac{A_{O-Ring}}{79 \%} = \frac{A_{79 \%}}{100 \%}$$

$$A_{79 \%} = \frac{A_{O-Ring} \times 100 \%}{79 \%} = 0,9532 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_{O-Ring}}{91 \%} = \frac{A_{91 \%}}{100 \%}$$

$$A_{91 \%} = \frac{A_{O-Ring} \times 100 \%}{91 \%} = 0,8630 \text{ mm}^2$$

$$0,8630 \text{ mm}^2 < A_{DR} < 0,9532 \text{ mm}^2$$

$$A_{DR} = \frac{a^2}{2} \quad (4.2)$$

Durch die Standardsenkung eines M3-Gewindes ist  $a$  mit 1,38 mm bereits festgelegt. Somit ergibt sich ein  $A_{DR}$  von 0,9522 mm<sup>2</sup>, welches im geforderten Bereich liegt.

Als Werkstoff erwies sich letztendlich Erodierkupfer 2.0060 E-Cu für die gewünschte Geometrie als gut bearbeitbar. Weiterhin besitzt es eine sehr gute Leitfähigkeit. Abschließend ist eine eingebaute Potentialmesssonde im Querschnitt in Abbildung 4-5 zu sehen.

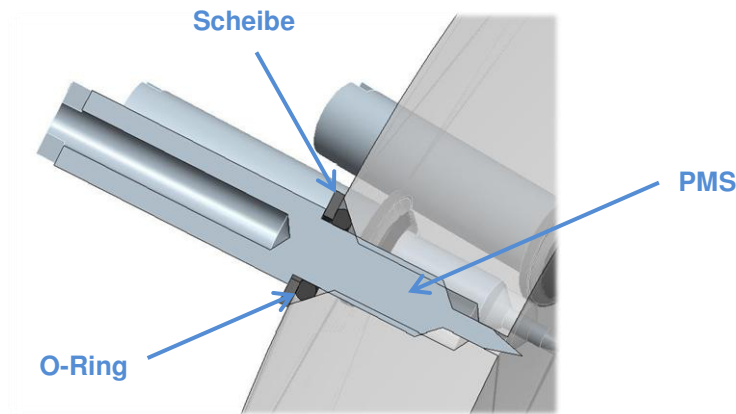


Abbildung 4-5: Eingebaute PMS

### 4.3 Auslegung der äußeren Sphäre

Die Geometrie der äußeren Sphäre ist im Grunde genommen durch die vorrangegangenen Voruntersuchungen bereits festgelegt. Wichtige Parameter sind dabei der Innendurchmesser der äußeren Sphäre, die Wandstärke sowie die Anordnung der beiden Messsysteme. Weiterhin ist bekannt, dass für spätere Versuchsstadien eine weitere obere Halbschale benötigt wird. Es ist allerdings noch zu klären, ob die entstandene Konstruktion den Anforderungen entspricht und das Material die auftretenden Kraftverhältnisse kompensieren kann. Am Behälter sollte es maximal zu Verschiebungen von  $\pm 0,01$  mm kommen. Zum einen wirkt im gefüllten Zustand durch das GaInSn ein hydrostatischer Druck auf die Behälterwandung. Zum anderen gibt es im geleerten Zustand durch die Gewichtskraft der inneren Sphäre eine weitere Belastung. Letzteres kann allerdings momentan noch nicht untersucht werden, da zunächst die innere Sphäre ausgelegt werden muss.

Weiterhin ist für den Behälter zu klären, wie beide Halbschalen miteinander formschlüssig verbunden und ordnungsgemäß abgedichtet werden können. Darüber hinaus ist durch eine geeignete Zentrierung die Koaxialität der beiden Halbschalen zu gewährleisten.

### 4.3.1 Erster Berechnungsentwurf - Spannungen und Verschiebungen

Zunächst werden die durch den hydrostatischen Druck auftretenden Spannungen und Verschiebungen am Behälter ermittelt. Hier wird nur der hydrostatische Druck berücksichtigt, da aufgrund der geringen maximalen Rotationsfrequenzen von -0,5 bis 0,5 Hz davon ausgegangen wird, dass die auftretenden Geschwindigkeiten in Richtung der Behälterwand eine vernachlässigbar geringe Kraft erzeugen.

Die dazu benötigten Werkstoffkennwerte des PMMA sind in Tabelle 4-2 gelistet und stammen aus den Werkstoffdatenblättern der Firma EVONIK Industries [ETDP2013], welche als Zulieferer des Rohmaterials für die Fertigung des Behälters ausgewählt wurde.

<b>Dichte</b>	1190	$\frac{kg}{m^3}$
<b>E-Modul</b>	3300	$\frac{N}{mm^2}$
<b>Querkontraktionszahl</b>	0,35	
<b>Schubmodul</b>	1222	$\frac{N}{mm^2}$
<b>Max. Zugfestigkeit</b>	80	$\frac{N}{mm^2}$
<b>Max. zul. Materialspannung</b>	5	$\frac{N}{mm^2}$

**Tabelle 4-2: Werkstoffkennwerte PMMA**

Die Berechnung erfolgte unter Zuhilfenahme des Programmes Ansys Workbench 13. Zunächst wurde die Geometrie für die Berechnung vereinfacht. Da im gefüllten Zustand eine formschlüssige Geometrie des Behälters vorhanden ist, wird dieser zur Berechnung nun nicht aus zwei Bauteilen bestehend angenommen, sondern aus einem verbundenen. Die Messpositionen der Potentialmesssonden werden nicht berücksichtigt, ebenso wie die noch auszulegenden Komponenten Ausgleichsbehälter und Abfluss. Für den ersten Berechnungsentwurf wird auch die Belastung durch die innere Sphäre im geleerten Zustand nicht berücksichtigt. In Tabelle 4-3 sind Festlegung und Randbedingung zur ersten Berechnung des Bauteils aufgelistet. Der Versuchsbehälter wird an der unteren Fläche des Fußes fest eingespannt. In Z-Richtung ist eine Verschiebung nicht möglich, da der Behälter auf dem Drehtisch stehen wird. In Y- und X-Richtung ist der Behälter an der Unterseite durch die Verschraubung am Drehtisch ebenfalls nicht verschiebbar. Auf das gesamte

Bauteil wirkt die Erdanziehungskraft und auf die Innenseite des Versuchsbehälters wirkt der hydrostatische Druck, der durch das Flüssigmetall erzeugt wird. Dazu werden die Dichte des GaInSn und die Füllhöhe des Behälters in Abhängigkeit der Lage des Koordinatensystems benötigt. Dieses befindet sich im Zentrum der Kugelform des Behälters, weshalb die Füllhöhe in Z-Richtung bei 90 mm liegt.

<b>Annahme</b>	Drehtisch ist Auflager und unendlich steif	
<b>FE-Netz und Elemente</b>	Knotenanzahl	15664
	Elementanzahl	8871
	Elementgröße	programmgesteuert
<b>Netzerzeugung</b>	Automatische Elementgrößen- und Typzuweisung	
<b>Einspannung</b>	An Grundfläche eingespannt; nicht in X,Y,Z verschiebbar	
<b>Hydro.-stat. Druck</b>	Wirkt auf Innenfläche des Behälters	
<b>Erdanziehungskraft</b>	Wirkt auf gesamtes Bauteil	
<b>Dichte GaInSn</b>	$6360 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	
<b>Hydro.-stat. Beschleunigung</b>	$9,8066 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ (Gravitationsbeschleunigung)	
<b>Füllhöhe des Behälters</b>	90 mm in Z-Richtung, 0 mm in X und Y-Richtung	

**Tabelle 4-3: Erster Berechnungsentwurf - Festlegungen und Randbedingungen**

Abbildung 4-6 zeigt die am Bauteil geltenden Randbedingungen. A verdeutlicht die Erdanziehungskraft, B den hydrostatischen Druck auf die Behälterinnenwand an der Füllhöhe und C zeigt auf die Grundfläche, an welcher die Verschiebung in X-, Y- und Z-Richtung gleich null ist. In Abbildung 4-7 wird der Verlauf des hydrostatischen Drucks an der Behälterinnenwand nochmals dargestellt.

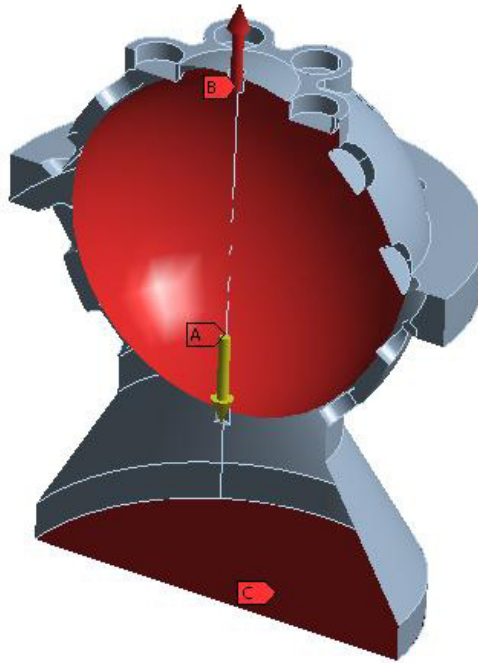


Abbildung 4-6: Randbedingungen Behälter

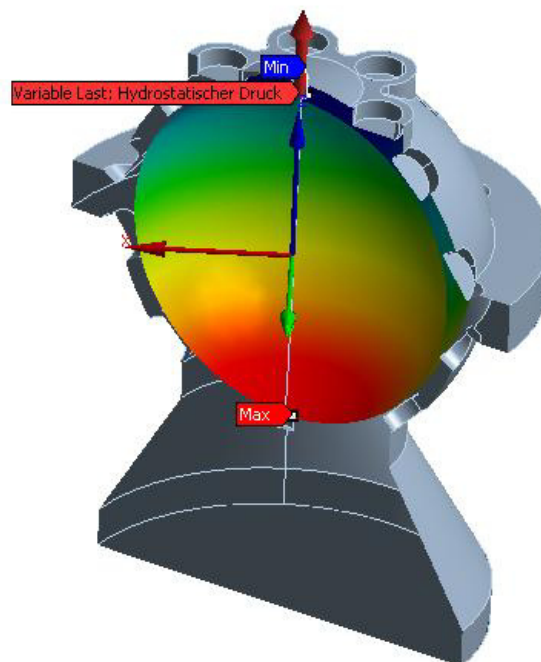


Abbildung 4-7: Hydrostatischer Druck



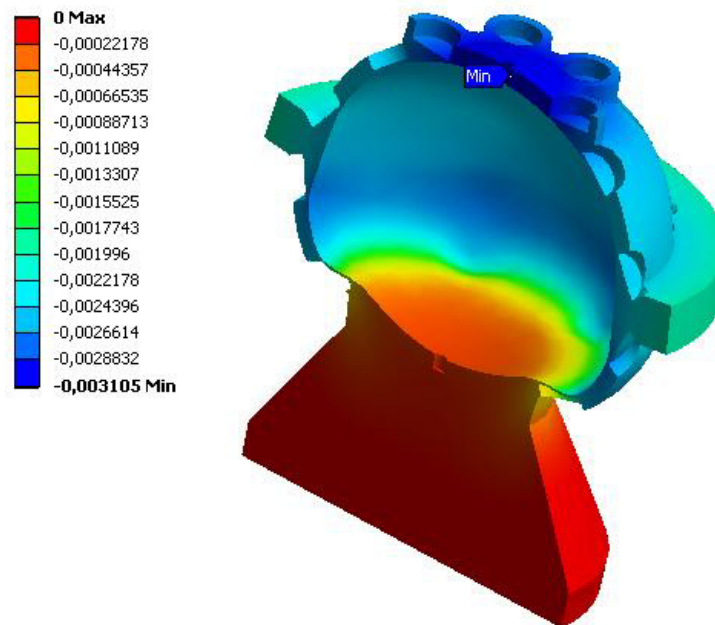
Am Behälterboden entsteht somit ein hydrostatischer Druck von 0,0112 MPa (ca. 0,1 bar). Durch die Simulation der auftretenden Kräfte am Behälter konnten in Ansys die folgenden Spannungen und Verschiebungen ermittelt werden.

		Spannung $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Schubspannung $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Verschiebung [mm]
<b>X</b>	<b>Min.</b>	-0,0357	-	-0,001835
	<b>Max.</b>	0,1585	-	0,001816
<b>Y</b>	<b>Min.</b>	-0,0444	-	-0,001875
	<b>Max.</b>	0,1172	-	0,001873
<b>Z</b>	<b>Min.</b>	-0,1100	-	-0,003105
	<b>Max.</b>	0,0396	-	0
<b>XY</b>	<b>Min.</b>	-	-0,0611	-
	<b>Max.</b>	-	0,0617	-
<b>XZ</b>	<b>Min.</b>	-	-0,0378	-
	<b>Max.</b>	-	0,0383	-
<b>YZ</b>	<b>Min.</b>	-	-0,0388	-
	<b>Max.</b>	-	0,0382	-

**Tabelle 4-4: Erster Berechnungsentwurf - Spannungen und Verschiebungen**

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass durch den hydrostatischen Druck und die herrschende Gravitationsbeschleunigung keine problematischen Spannungen und Verschiebungen bei einem Vergleich mit den maximal zulässigen Kennwerten auftreten. Die Verschiebungen in Z-Richtung (siehe Abbildung 4-8) sind vorherrschend und liegen mit -0,003 mm am obersten Punkt des Behälters deutlich unter der geforderten Toleranz von  $\pm 0,01$  mm. In X- und Y-Richtung verhält sich die Verschiebung annähernd gleich aufgrund der rotationssymmetrischen Geometrie. Die auftretenden Spannungen an den mit dem Fluid in direktem Kontakt stehenden Flächen sind in Z-Richtung eher gering. Der Höchstwert von  $-0,1100 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$  kommt durch die Kerbwirkung am Übergang des Behälters

zum Fuß zustande und sollte durch Verrunden des Überganges egalisiert werden können. In X- und Y-Richtung liegen die Höchstwerte auf Höhe der untersten Messpositionen radial  $45^\circ$ . Die Werte unterschreiten allerdings ebenfalls die maximale zulässige Materialspannung von  $5 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$  deutlich.



**Abbildung 4-8: Verschiebung in Z-Richtung in mm**

Die Schubspannungen in der XZ- und YZ-Ebene sind annähernd gleich, aber ebenso wie die Schubspannung in der XY-Ebene eher vernachlässigbar klein. Mit Hilfe der Vergleichsspannungshypothese von Mises konnte festgestellt werden, dass die Vergleichsspannung  $\sigma_V$  im Zentrum der unteren Messpositionen radial  $45^\circ$  am größten ist (siehe Abbildung 4-9). Alle weiteren Konturplots befinden sich in den Anlagen Teil C.

Trotz der bereits deutlich ausreichenden Wandstärke wurde diese an der unteren Halbschale, aus Sicherheitsgründen, auf 20 mm verdoppelt. Die Spannungen und Verschiebungen werden dadurch nur geringfügig verringert (siehe Tabelle 4-5). Auf die Darstellung der Konturplots des zweiten Berechnungsentwurfs wurde verzichtet. Allerdings ist zu beachten, dass durch die Komponenten Ausgleichsbehälter und Abfluss die Geometrie des Behälters nochmals verändern wird. Darüber hinaus wird, wie bereits schon erwähnt, im geleerten Zustand durch die innere Sphäre eine weitere Last erzeugt. Deshalb sind nach abgeschlossener Auslegung des Versuchsbehälters nochmals die auftretenden Belastungen nachzurechnen.

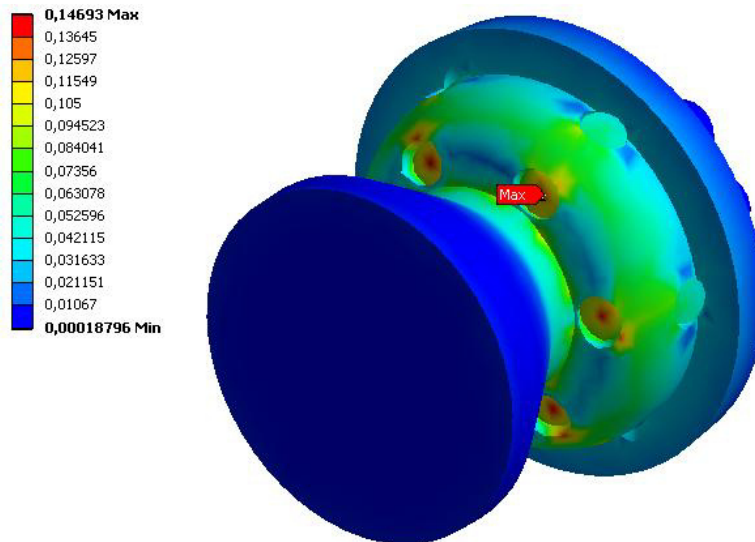


Abbildung 4-9: Von Mises Vergleichsspannung  $\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$

		Spannung $\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$	Schubspannung $\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$	Verschiebung [mm]
X	Min.	-0,0296	-	-0,000937
	Max.	0,0754	-	0,000941
Y	Min.	-0,0339	-	-0,001040
	Max.	0,0536	-	0,001027
Z	Min.	-0,0780	-	-0,002309
	Max.	0,0190	-	0
XY	Min.	-	-0,0378	-
	Max.	-	0,0350	-
XZ	Min.	-	-0,0245	-
	Max.	-	0,0298	-
YZ	Min.	-	-0,0265	-
	Max.	-	0,0269	-

Tabelle 4-5: Zweiter Berechnungsentwurf - Spannungen und Verschiebungen

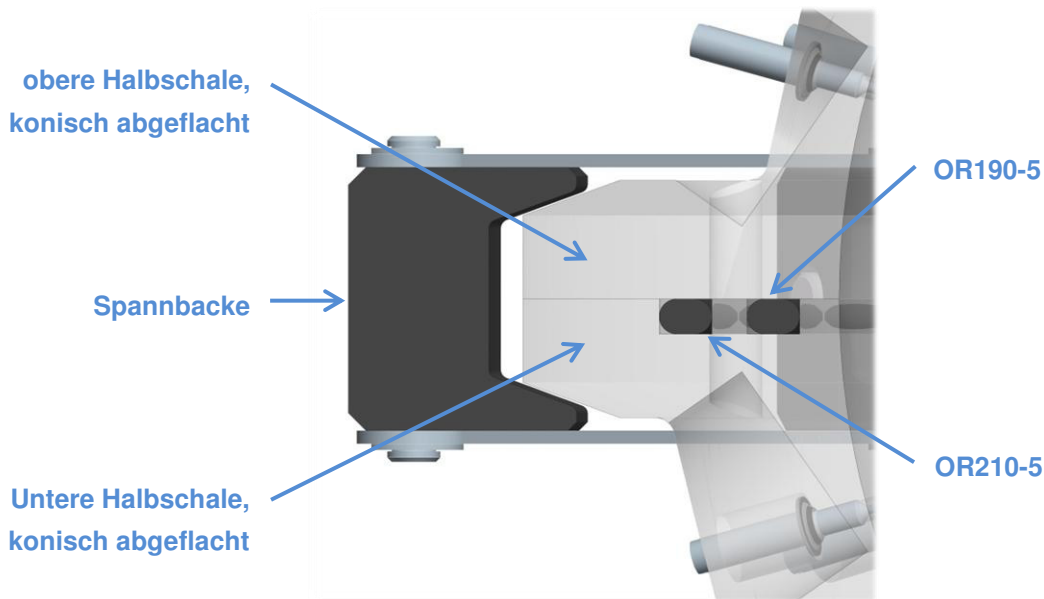
### 4.3.2 Verschraubung und Abdichtung der beiden Halbschalen

Die erste Idee bestand darin, beide Halbschalen direkt miteinander zu verschrauben. Allerdings ist aus den Voruntersuchungen zur UDV-Sensorhalterung bekannt, dass die Gewindegänge im Werkstoff PMMA bei einem mehrmaligen Verschrauben und Lösen zu stark verschleifen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die beiden Halbschalen durch diese Variante nicht ordnungsgemäß abgedichtet werden können. Durch die punktuelle Belastung kann es im Material zu unerwünschten Spannungen kommen.

Der nächste Gedanke bestand darin, über die obere und untere Halbschale einen Überwurfflansch zu führen. Durch Verschrauben dieser beiden wird die äußere Sphäre verbunden. Beide Halbschalen benötigen dazu eine Krempe auf Höhe der Teilungsebene. Bei dieser Variante wird das Problem der punktuellen Belastung vermieden. Ebenso kann ein geeigneter Werkstoff für die beiden Flansche gewählt werden, bei dem der starke Verschleiß der Gewindegänge nicht auftritt. Letztendlich kann es aber auch hier zu Spannungsunterschieden im Behältermaterial kommen, da nicht alle Schraubenverbindungen identisch sein werden.

Die Lösung brachte letztendlich ein Flanschverbindungssystem aus der Vakuumtechnik, welches auf einem Schnellspanner basiert. Dazu werden zwei Flansche nach ISO 3669-2 benötigt, die jeweils an einer Seite konisch abgeflacht sind. Eine Spannkette bildet dazu das Gegenstück. Sie besitzt Spannbacken, die nach innen ebenfalls konisch abgeflacht sind und über die Flansche greifen. Die Spannkette wird durch eine Verschraubung zusammengezogen. Dadurch verringert sich der Durchmesser der Spannkette und die beiden Flansche werden somit durch die Spannbacken immer weiter zusammengedrückt. An beiden Halbschalen wird die Krempe nun nach Norm an die konische Geometrie angepasst. Durch diese Variante wird eine gleichmäßige Verspannung der beiden Halbschalen erzielt. Zunächst musste aber eine verwendbare Nennweite ermittelt werden. Die Recherche nach einem geeigneten Hersteller für die gewählte Nennweite NW 200 stellte sich als schwierig heraus [EVAC2013]. Letztendlich konnte aber mit der Firma Allectra, die in Deutschland als Vertreiber der Firma EVAC arbeitet, eine Sonderanfertigung vereinbart werden.

Zur Abdichtung wurden zwei O-Ringe aus [HFD2013] gewählt, die an der Teilungsebene in der unteren Hälfte der äußeren Sphäre untergebracht sind. Die O-Ringe stammen aus dem Standardprogramm der Firma Hansaflex. OR210-5 ist der äußere und OR190-5 der innere Dichtring. Die Auslegung der Nuten erfolgt nach [VATC2010]. Abbildung 4-10 zeigt die beiden Halbschalen auf Höhe der Teilungsebene im Querschnitt. Dabei sind nochmals das Prinzip der Spannkette und die Abdichtung beider Halbschalen zu erkennen.

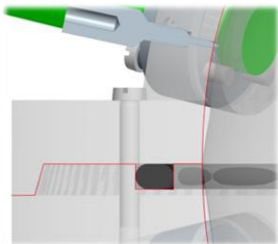
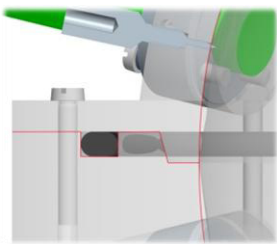
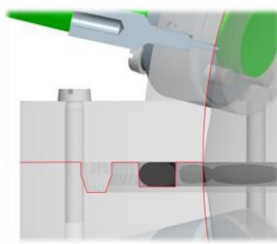
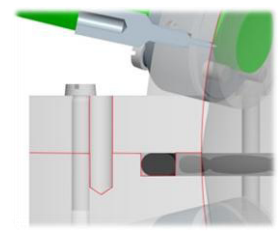


**Abbildung 4-10: Verschraubung und Abdichtung der äußeren Sphäre**

### 4.3.3 Zentrierung der beiden Halbschalen

Um die Koaxialität der beiden Halbschalen zu gewährleisten und somit eine geschlossene Oberfläche der Behälterinnenseite zu erzielen, müssen beide Halbschalen zueinander ausgerichtet werden. Dazu wurden vier Möglichkeiten, die auf drei verschiedenen Prinzipien beruhen, ausgearbeitet. Die ersten beiden Varianten basieren auf dem Prinzip der Zentrierhülse. An der oberen und unteren Halbschale befindet sich dazu jeweils eine spitzwinklige Fase beziehungsweise Einführschräge. Beim Zusammenführen gleitet die obere Halbschale an der Geometrie der unteren entlang und richtet somit die beiden Hälften formschlüssig zueinander aus. Der Unterschied bei diesen drei Varianten besteht in der Position der Zentrierung. Eine weitere Möglichkeit zur Ausrichtung ist durch das Feder-Nut-Prinzip gegeben. Die geeignete Anordnung von Zentrierstiften könnte eine weitere Variante zur Gewährleistung der Koaxialität beider Halbschalen sein. In Tabelle 4-6 werden die soeben erwähnten Möglichkeiten zur Zentrierung gegenüber gestellt und die Vor- und Nachteile abgewogen. Dabei ist zu beachten, dass durch die Zentrierung die Abdichtung und auch die Verspannung der beiden Halbschalen nicht beeinflusst werden sollte. Weiterhin ist auch der Aspekt der Fertigung zu beachten, da die Halbschalen während der Fertigung möglicherweise mehrfach umgespannt werden müssen. Möglicherweise kann die Zentriervariante gleichzeitig zur Ausrichtung während der Fertigung genutzt werden.

Tabelle 4-6: Zentriervarianten

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Prinzip	Einführschräge	Einführschräge	Feder-Nut	Zentrierstifte
Bild				
Bezeichnung	Schräge außen	Schräge innen	Feder-Nut	Stifte
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ausreichend Platz für Abdichtung</li> <li>- Zentrierung nicht mit Fluid im Kontakt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ausreichend Platz für Abdichtung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- optimale formschlüssige Zentriervariante, wenn ordnungsgemäß und ausreichend genau gefertigt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ausreichend Platz für Abdichtung</li> <li>- kein Kontakt zum Fluid</li> <li>- geringer Platzbedarf</li> <li>- min. Fertigungsaufwand</li> <li>- für Positionierung während Fertigung geeignet</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Platzbedarf höher</li> <li>- beim Umspannen während Fertigung wahrscheinlich problematisch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Platzbedarf höher</li> <li>- beim Umspannen während Fertigung wahrscheinlich problematisch</li> <li>- Zentrierung mit Fluid im Kontakt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Platzbedarf sehr hoch</li> <li>- wenig Platz für Abdichtung</li> <li>- beim Umspannen während Fertigung wahrscheinlich problematisch</li> <li>- aufwändige Fertigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unterbringung zweier O-Ringe verschiebt Bohrungen evtl. zu weit nach außen → könnte bei Fertigung zu Ausplatzungen führen</li> </ul>

In den in Tabelle 4-6 zu sehenden Grafiken wird die Abdichtung nur durch einen Dichtring angedeutet. Die Anpassung der Geometrie an die Spannkette ist ebenfalls nicht zu erkennen. Der Grund dafür ist, dass die Zentrierungsvarianten vor der in Kapitel 4.3.2 behandelten Thematik ausgearbeitet wurden. Das Funktionsprinzip ist dennoch zu erkennen. Variante 4 wurde als Lösung ausgewählt, da sie im Gegensatz zu den anderen mit geringem Aufwand gefertigt werden kann. Weiterhin ist von Vorteil, dass diese Variante gleichzeitig die Möglichkeit zur Positionierung der Halbschalen während der Fertigung ermöglicht. Bei den Varianten 1-3 ist der Fertigungsaufwand deutlich größer, möglicherweise sogar mit dem verwendeten Acrylglas gar nicht umsetzbar. Durch die Kraft, mit der ein Fräser gegen die Einführschrägen beziehungsweise die Feder drückt, könnte es zum Ausplatzen kommen. Weiterhin wird bei diesen drei Varianten das Umspannen des Bauteils während der einzelnen Fertigungsschritte an der äußeren und inneren Oberfläche komplizierter sein. Die vierte Variante hat zusätzlich den geringsten Platzbedarf, da sie lediglich drei Bohrungen in der oberen und unteren Halbschale benötigt.

## 4.4 Gestaltung des Abflusses

Der Behälter wird zur Versuchsdurchführung von oben mit Argon beaufschlagt und soll von unten mit dem Flüssigmetall gefüllt und entleert werden. Dabei ist zu beachten, dass sich die Lagerung der inneren Sphäre ebenfalls im Bereich des Abflusses befindet. Somit muss durch die Bohrung gleichzeitig die Welle hindurchgeführt werden und das Fluid in den Behälter gelangen können. Der Durchmesser ist allerdings so gering wie möglich zu halten, damit die Strömungsverhältnisse während der Versuchsdurchführung nicht beeinflusst werden. Unter [SCES2013] wurde ein Durchmesser der Abflussbohrung von 8 mm als optimal ermittelt. Zur Lagerung entstand ein Bauteil (siehe Abbildung 4-11), welches mit drei Langlöchern versehen ist und somit gleichzeitig den Durchfluss des Fluids gewährleistet. Diese Scheibe wird im Abfluss verschraubt. Kommt es zum Versagen des Lagers, kann dieses einfach durch Herausnehmen der Scheibe demontiert werden.

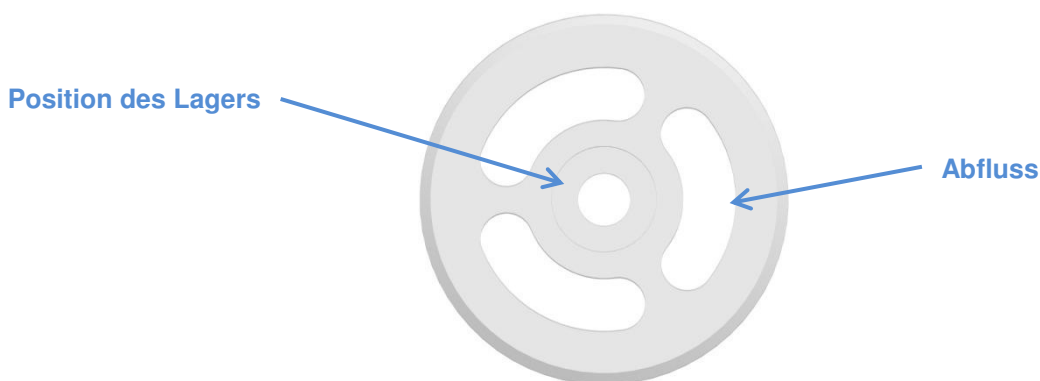
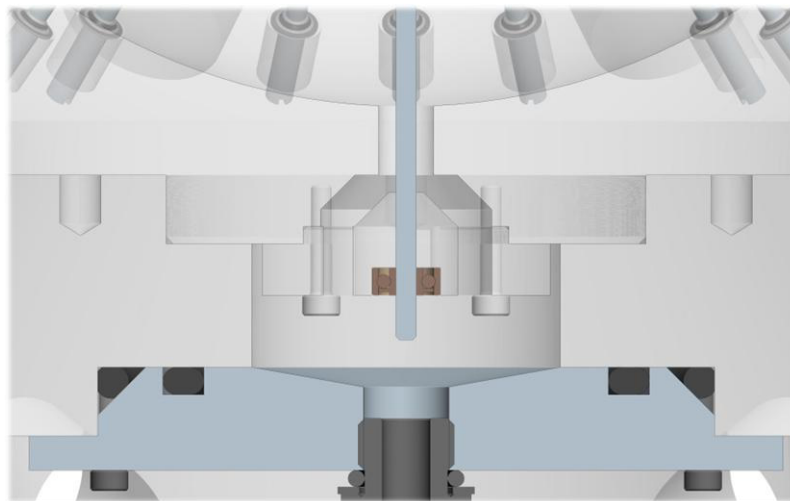


Abbildung 4-11: Lagerhalterung im Abfluss

Verschlossen und abgedichtet wird der Behälter im Bereich des Abflusses mittels eines Deckels. An diesem wird für den Füll- und Entleervorgang eine absperrbare Rohrleitung montiert. Durch zwei O-Ringe aus [HFD2013] erfolgt die Abdichtung des Bauteils. Ähnlich wie bei den Potentialmesssonden wird der äußere Dichtring (OR80-5) an einer Fase verbaut. Die Auslegung des Dichtraums erfolgte nach dem gleichen Prinzip wie unter 4.2.2.2. Daraus ergab sich für den Deckel eine Fase von  $7 \times 45^\circ$ . Der zweite O-Ring (OR70-5) wird in einer Nut verbaut. Da an dieses Bauteil ein Rohranschluss verschraubt werden soll, wird dieser nicht aus PMMA, sondern aus Edelstahl gefertigt, um dem Problem des Gewindeverschleißes zu entgehen. Für einen optimalen Abfluss wird die Innenseite des Deckels hin zur Rohrleitung abgeflacht. Die zur Verschraubung des Deckels und der Scheibe benötigten Gewindebohrungen im Fuß des Behälters werden wiederum durch Helicoils geschützt. Weiterhin wurden am Fuß vier 35 mm große Durchgangsbohrungen zur Kabledurchführung vorgesehen. Folgende Abbildung zeigt den Querschnitt des Aufbaus des Abflusses.

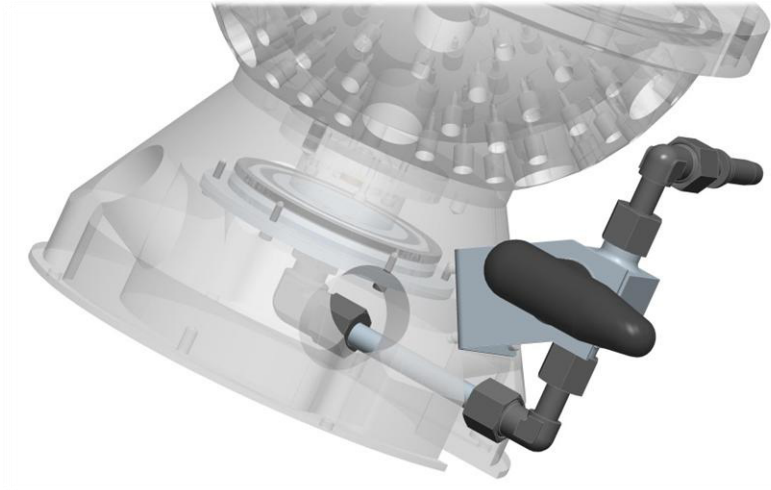


**Abbildung 4-12: Querschnitt - Lagerhalterung und Deckel Abfluss**

Bei der Recherche nach geeigneten Komponenten für die Rohrleitung wurde sich auf das Standardprogramm nach [HFL2013] der Firma Hansa-flex festgelegt. Für die Auswahl war dabei zu beachten, dass der Platzbedarf der Rohrleitungskomponenten so gering wie möglich zu halten ist, allerdings der Rohrleitungsquerschnitt für einen optimalen Abfluss nicht zu gering sein darf. Letztendlich wurde die Nennweite NW08 gewählt. Für die Rohrleitung werden fünf verschiedene Komponenten benötigt. Zunächst wird ein richtungsstellbares Winkelstück im Deckel verschraubt. Dies ist notwendig, damit die Richtung der Leitung genau auf die dafür vorgesehene Durchführung am Behälter einstellbar ist. Daran wird ein Rohrstück befestigt, wodurch die Leitung auf die äußere Seite des Behälters ver-



legt wird. Es folgen nun ein Winkelstück und anschließend ein Kugelhahn der Firma Hylok [HYL2013] zur Absperrung der Rohrleitung. Danach wird abschließend, wiederum über ein Winkelstück, ein Pressnippel für einen Schlauchanschluss am Kugelhahn befestigt. Alle Bauteile sind nach dem Prinzip DIN 2353-Rohrverschraubung 24° miteinander verbunden. Über ein Halteblech wird die Leitung nochmals am Fuß des Behälters gesichert. Die Rohrleitung samt Halteblech ist in Abbildung 4-13 zu sehen.



**Abbildung 4-13: Rohrleitung**

Mittels der Ausflussformel nach Toricelli und dem Querschnitt der Rohrleitung kann die Ausflusszeit des Behälters überschlägig ermittelt werden. Mit der Toricelli-Gleichung lässt sich die Ausflussgeschwindigkeit  $V$  in Abhängigkeit der Füllhöhe  $h$  bei gleichbleibendem Querschnitt des Behälters errechnen.

$$V = \sqrt{2gh} \quad (4.3)$$

Allerdings ändert sich, bedingt durch die Geometrie der inneren und äußeren Sphäre, ständig die Querschnittsfläche des Flüssigkeitsspiegels. Deshalb erfolgt eine Zerlegung des Volumens in dünne Scheiben mit einer Höhe von 0,5 mm. Für diese werden jeweils, in Abhängigkeit der Füllhöhe und der Querschnittsfläche, die Geschwindigkeit und das Volumen  $\Delta Vol_{Scheibe}$  neu berechnet. Aus der Geschwindigkeit und dem Querschnitt der Rohrleitung ergibt sich der momentan vorhandene Volumenstrom  $\Delta \dot{V}$ .

$$\Delta \dot{V} = V A_{Rohr} \quad (4.4)$$

Letztendlich kann über das Volumen der Scheibe und dem dazugehörigen Volumenstrom die benötigte Zeit  $\Delta t$  errechnet werden.

$$\Delta t = \frac{\Delta Vol_{Scheibe}}{\Delta \dot{V}} \quad (4.5)$$

Die Zeiten aller Fluid-Scheiben werden aufsummiert und ergeben die Ausflusszeit. Die Berechnung erfolgte im Excel. Dazu wurden die Behälterwände in Form von Funktionen zur Ermittlung der aktuellen Querschnittfläche umgesetzt. Ein Auszug aus der Berechnung befindet sich in den Anlagen Teil D. Unter der Verwendung der inneren Sphäre mit einem Durchmesser von 90 mm ergibt sich eine Ausflusszeit von 60 s. Für die kleinere Sphäre erhöht sich die Zeit auf 66 s. Die Ausflusszeit ist für die Auslegung des Argonanschlusses notwendig. Das Argon muss mit dem gleichen Volumenstrom eingeleitet werden, besitzt dabei aber eine höhere Strömungsgeschwindigkeit von 20 m/s bei geringerem Durchmesser. Zu Beginn des Entleervorgangs herrscht der größte Volumenstrom des GalnSn. Dieser muss maximal durch das Argon erzielt werden. Daraus ergibt sich ein Durchmesser der Argonleitung von ca. 2,5 mm. Da sich mit abnehmender Füllhöhe der Volumenstrom aber mindert, baut sich durch das Argon auf das GalnSn ein Druck auf. Dadurch verringert sich die Ausflusszeit wohlmöglich nochmals.

## 4.5 Auslegung Ausgleichsbehälter

An der oberen Halbschale der äußeren Sphäre ist ein Ausgleichsbehälter zur Kompensation von Temperaturschwankungen vorzusehen. Ähnlich wie beim Abfluss ist dieser mit einer 8 mm großen Bohrung mit dem Versuchsbehälter verbunden. In der Mitte wird wiederum die Antriebswelle der inneren Sphäre hindurchgeführt. Der Ausgleichsbehälter wird mit einem Deckel verschlossen. In diesem soll die obere Lagerung der inneren Sphäre umgesetzt werden. Für die verschiedenen Versuchsstadien sollte der gleiche Deckel samt Lagerung verwendbar sein. Allerdings wird bei V2 und V4 durch den kleineren Teilkreis der parallelen Messplätze der UDV-Sensoren der mögliche Außendurchmesser des Ausgleichsbehälters auf 35 mm beschränkt. Weiterhin wird eine Wandung von 5 mm angenommen. Somit ist genügend Platz zur Verschraubung des Deckels am Ausgleichsbehälter vorhanden. Dieser kann nun bei der folgenden Auslegung maximal in der Höhe variiert werden. Bei der Auslegung ist weiterhin zu beachten, dass nicht nur das im Behälter befindliche Fluid berücksichtigt werden muss, sondern die Rohrleitung ebenfalls gefüllt ist. Es wird von einer Temperaturschwankung im Bereich von 5-40 °C ausgegangen.

Zunächst wurde das vorhandene Volumen aus dem Modell ermittelt. Da der Versuchsbehälter und die Rohrleitung unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen, muss in Volumen im Behälter  $V_{VB}$  und Volumen in der Rohrleitung  $V_{Rohr}$  unterschieden werden. Das vorhandene Volumen des GaInSn  $V_{Fluid}$ , bei einer Ausgangstemperatur von 20 °C, erhält man durch die Addition der beiden Volumina.

Bezeichnung	Volumen in [mm <sup>3</sup> ]	Hinweis
$V_{VB\_gro\beta}$	2700389,6	Volumen bei innerer Kugel mit d=90 mm
$V_{VB\_klein}$	2959877,3	Volumen bei innerer Kugel mit d=45 mm
$V_{Rohr}$	8370,4	
$V_{Fluid\_gro\beta}$	2708760	
$V_{Fluid\_klein}$	2968247,7	

Tabelle 4-7: vorhandene Volumina bei 20 °C

Werkstoff	Bezeichnung	Wärmeausdehnungskoeffizient in [K <sup>-1</sup> ]
Stahl	$\alpha_{Stahl}$	$11,8 \cdot 10^{-6}$
PMMA	$\alpha_{PMMA}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$
GaInSn	$\gamma_{Fluid}$	$1,01514 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 4-8: Wärmeausdehnungskoeffizienten

Im Allgemeinen berechnet sich die Zu- bzw. Abnahme des Volumens wie folgt.

$$\Delta V = 3\alpha \Delta T V \quad (4.6)$$

$$\Delta V = \gamma \Delta T V \quad (4.7)$$

Der für Feststoffe angegebene Wert bezieht sich auf den Längenausdehnungskoeffizienten. Da sich die Werkstoffe in jede Raumrichtung gleichmäßig ausdehnen, geht dieser Wert dreifach ein.  $\Delta T$  ist dabei die Temperaturdifferenz bezogen auf die Ausgangstemperatur von 20 °C. Um die zusätzlich benötigte Menge an GalnSn zu bestimmen, wurden zunächst die Volumina für die maximale Temperatur von 40 °C errechnet, da die Ausdehnung des Behälters deutlich größer wie die des Fluids ist. Dies entspricht einem  $\Delta T$  von 20 K.

Volumendifferenz bei einem  $\Delta T$  von 20 K am Beispiel große innere Kugel:

$$\Delta V_{Stahl} = 3 \times 11,8 \times 10^{-6} \frac{1}{K} \times 20 K \times 8370,4 \text{ mm}^3 = 5,93 \text{ mm}^3$$

$$\Delta V_{VB\_gro\beta} = 3 \times 70 \times 10^{-6} \frac{1}{K} \times 20 K \times 2700389,6 \text{ mm}^3 = 11341,64 \text{ mm}^3$$

$$\Delta V_{Fluid} = 101,514 \times 10^{-6} \frac{1}{K} \times 20 K \times 2708760 \text{ mm}^3 = 5499,54 \text{ mm}^3$$

Das vorhandene Volumen bei 40 °C beträgt 2720107,57 mm<sup>3</sup>. Das Volumen des Fluids hat sich allerdings nur auf 2714259,54 mm<sup>3</sup> ausgedehnt. Aus der Differenz ergibt sich ein zusätzlich benötigtes Volumen an GalnSn von ca. 5850 mm<sup>3</sup>. Daraus folgt eine Füllhöhe des Ausgleichsbehälters von 12 mm. Bei 5 °C muss durch die starke Verringerung des vorhandenen Volumens, bedingt durch den großen Wärmeausdehnungskoeffizient des PMMA, ein zusätzliches Volumen GalnSn von 3000 mm<sup>3</sup> im Ausgleichsbehälter aufgenommen werden. Das bedeutet, dass sich dieser auf eine Höhe von 21 mm füllen wird.

Für die kleinere innere Sphäre erfolgte die Berechnung nach dem vorangegangenen Schema. Die Füllhöhe beträgt ebenfalls 12 mm. Allerdings erhöht sich hier der Flüssigkeitsspiegel bei einer Temperatur von 5 °C auf 22 mm.

Für die Auslegung ist wichtig, dass der Argonanschluss über der möglichen Füllhöhe liegt, damit dieser durch das Fluid nicht verschmutzt und das Argon immer oberhalb des Flüssigkeitsspiegels eingeleitet wird. Die Bohrung für den Argonanschluss wurde auf eine Höhe von 26,5 mm gelegt. Der Ausgleichsbehälter selbst ist 30 mm hoch.

## 4.6 Auslegung der innere Sphäre

Für die innere Sphäre war zunächst zu klären, welche durch das GalnSn auftretenden Auftriebskräfte überwunden werden müssen. Daraus ergibt sich dann ein möglicher Werkstoff, mit dem die innere Sphäre gefüllt werden muss. Weiterhin ist eine ordnungsgemäße Verbindung zur Antriebswelle zu schaffen, damit die gewünschte Rotation ge-

währleistet wird. Nach bisherigem Stand soll die Antriebswelle samt innerer Sphäre in der oberen Halbschale der äußeren Sphäre hängend gelagert werden. Ob eine durchgängige Welle bis in den Lagerpunkt im Bereich des Abflusses möglich ist oder diese eventuell geteilt werden muss, hängt letztendlich von der gewählten Vorzugsvariante und den Fertigungsmöglichkeiten ab. Die Lagerung wird in Kapitel 4.7 tiefgründiger diskutiert. Die folgenden Berechnungen und Auslegungen werden für beide innere Sphären durchgeführt, wobei sich die Funktionsweise und der Aufbau im Wesentlichen unterscheiden werden.

#### 4.6.1 Berechnung der Auftriebs- und benötigten Gewichtskräfte

Die Auftriebskraft, die durch das Fluid auf die innere Kugel wirkt, berechnet sich allgemein nach ( 4.8 ).

$$F_A = g\rho_{Fluid}Vol_{1\_klein/gro\beta} \quad ( 4.8 )$$

Die Volumina der beiden inneren Sphären wurden bereits unter Kapitel 4.5 ermittelt.  $Vol_{1\_gro\beta}$  beträgt 381704 mm<sup>3</sup> und für  $Vol_{1\_klein}$  erhält man einen Wert von 113097 mm<sup>3</sup>. Weitere Berechnungen erfolgen hier allerdings nur am Beispiel der größeren inneren Sphäre. Die gesamten Berechnungen zu beiden inneren Sphären befinden sich in den Anlagen Teil E.

$$F_{A\_gro\beta} = 9,81 \frac{m}{s^2} \times 6360 \frac{kg}{m^3} \times 0,00381704 m^3 = 23,807 N$$

Die Gewichtskraft der PMMA-Hohlkugel ist vernachlässigbar klein und wird deshalb nicht mit in die Berechnung einbezogen. Die Wandung dieser Kugel wurde zunächst auf 5 mm festgesetzt. Somit verringert sich das für die Füllung verfügbare Volumen. Damit die innere Sphäre im gefüllten Zustand des Versuchsbehälters in seiner hängenden Position bleibt, muss die Gewichtskraft des Inlays die Auftriebskraft geringfügig überschreiten. Als geeigneter Werkstoff erwies sich letztendlich Blei, da es zum einen eine hohe Dichte von  $11350 \frac{kg}{m^3}$  besitzt und zum anderen mit Hinsicht auf Beschaffung und Fertigung am kostengünstigsten gegenüber anderen möglichen Werkstoffe sein wird.

Besteht das Inlay komplett aus Blei, so ergibt sich die Gewichtskraft wie folgt.

$$F_{G\_gro\beta} = g \rho_{Blei} Vol_{Inlay\_gro\beta} \quad (4.9)$$

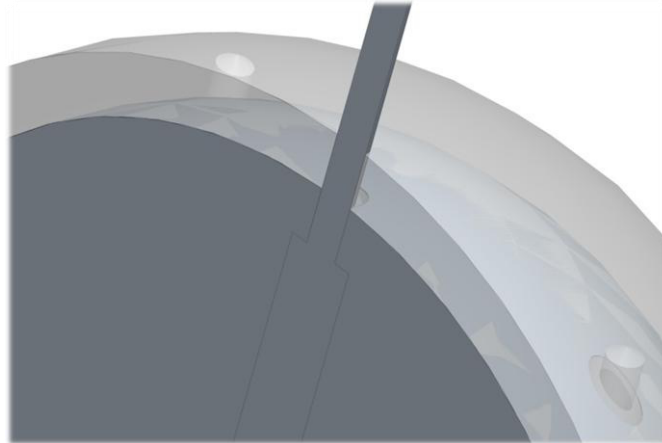
$$F_{G\_gro\beta} = 9,81 \frac{m}{s^2} \times 11350 \frac{kg}{m^3} \times \left( \pi \times \frac{4}{3} \times 0,04^3 \right) m^3 = 29,830 N$$

Für diesen Fall wäre die Gewichtskraft ausreichend. Zusätzlich addieren sich dazu noch die Gewichtskräfte der Welle und der PMMA-Hohlkugel. Nachteilig wäre aber die Fertigung des Bauteils. Es müsste gegossen werden, wozu wiederum erst eine Gießform benötigt wird. Spanende Bearbeitung ist kaum möglich, da der Werkstoff sehr weich ist. Eine andere Möglichkeit wäre es die Füllung aus Bleischrot herzustellen, welches mit Epoxidharz oder ähnlichem vergossen ist. Das Problem dabei ist allerdings die Schüttdichte des Bleischrotes. Laut Herstellerangaben [SAB2013] der Firma Schneider ASS ergibt sich bei einem Durchmesser der Bleikugeln von 2,5 mm ein Schüttgewicht von  $7300 \frac{kg}{m^3}$ . Das reicht allerdings bei einer Wandung der Hohlkugel von 5 mm nicht aus. Die Gewichtskraft würde lediglich 19 N betragen. Mit einer Verringerung der Wandstärke auf 2 mm wird die zu übertreffende Auftriebskraft knapp erreicht. Letztendlich fiel die Entscheidung aber auf die erste Variante, da auch mit der Firma Schneider Ass ein potentieller Hersteller der Blei-Inlays nach Zeichnung gefunden wurde.

## 4.6.2 Möglichkeiten zur Kombination Welle - innere Sphäre

### 4.6.2.1 Variante 1 - geteiltes Inlay und durchgängige Welle

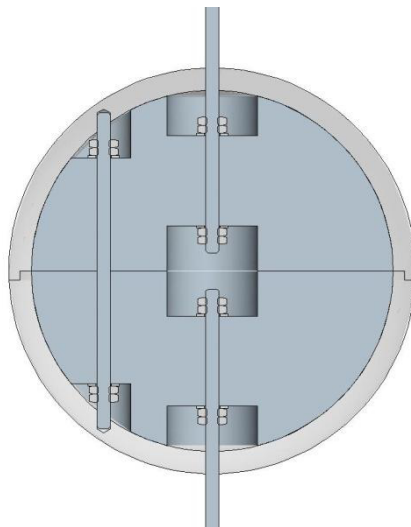
Bei dieser Variante wird der Bleikern in zwei gleichgroße Hälften geteilt, die von oben und unten über die Welle geschoben werden. Die Welle selbst wird in der Mitte von 3 mm auf 5 mm abgesetzt. Durch den Absatz erhalten beide Hälften des Bleikerns einen Anschlag und sind durch die gegenseitige Verschraubung nicht mehr verschiebbar. Am oberen und unteren Absatz wird die Welle zu einem Vierkant umgearbeitet, wodurch die Antriebskräfte auf die innere Sphäre übertragen werden können. Die Durchgangsbohrungen der Blei-Inlays müssen genau an die Geometrie der Welle angepasst werden. Durch ein Langloch greift das Blei-Inlay in den Vierkant. Die Hohlkugel aus PMMA wird ebenfalls in zwei Hälften geteilt, anschließend über die Welle auf den Bleikern geschoben und mit diesem verklebt. Die beiden PMMA-Halbschalen greifen ebenfalls in den Vierkant. Die Antriebswelle wird letztendlich durch einen Sicherungsring an der oberen Hälfte der äußeren Sphäre hängend gelagert. In Abbildung 4-14 ist diese Variante im Querschnitt zu sehen.



**Abbildung 4-14: Variante 1 - innere Sphäre**

#### **4.6.2.2 Variante 2 - geteiltes Inlay und geteilte Welle**

Ähnlich zur ersten Variante werden der Bleikern und die PMMA-Hohlkugel halbiert. Zusätzlich ist auch die Welle in ein oberes und unteres Element unterteilt. Anstatt des Vierkant zur Kraftübertragung werden hier jeweils die Wellenelemente an der oberen und unteren Bleihälfte direkt verschraubt. Dazu wird die Durchgangsbohrung an den Blei-Inlays beidseitig gesenkt, sodass die Verschraubung gekontert werden kann (siehe Abbildung 4-15). An den Wellenenden werden somit Gewinde benötigt. Danach können die beiden Bleihälften miteinander verschraubt und darauf die PMMA-Halbschalen verklebt werden. Die Lagerung kann wiederum über einen Sicherungsring oder einen Wellenabsatz am oberen Wellenelement erfolgen.



**Abbildung 4-15: Variante 2 - innere Sphäre**

#### 4.6.2.3 Variante 3 - kompaktes Inlay und durchgängige Welle

Bei der letzten Variante besteht das Blei-Inlay aus einem Bauteil. Von oben wird, ähnlich wie bei Variante 1, an der Position der Rotationsachse ein Langloch hinein gefräst. Dadurch wird wiederum über einen Vierkant an der Welle die Übertragung der Kräfte gewährleistet. Von unten besitzt das Blei-Inlay eine Bohrung vom Durchmesser 5 mm, so dass es von oben über den Vierkant der Welle geschoben werden kann, bis dieser greift. Über einen Sicherungsring, jeweils am oberen und unteren Ende, wird der Bleikern in seiner Position gehalten (siehe Abbildung 4-16). Die Welle wird, wie bereits schon erwähnt, auf 5 mm abgesetzt und besitzt zusätzlich einen 4 mm Vierkant. Die PMMA-Hohlkugel ist dennoch in zwei Hälften geteilt und muss über die Welle geschoben und am Blei-Inlay verklebt werden. Die Lagerung erfolgt über einen Sicherungsring oder einen Wellenabsatz.

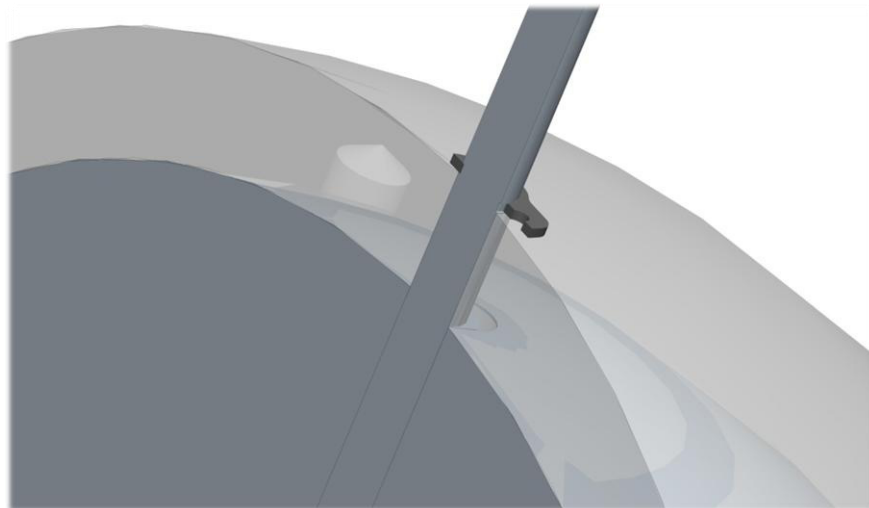


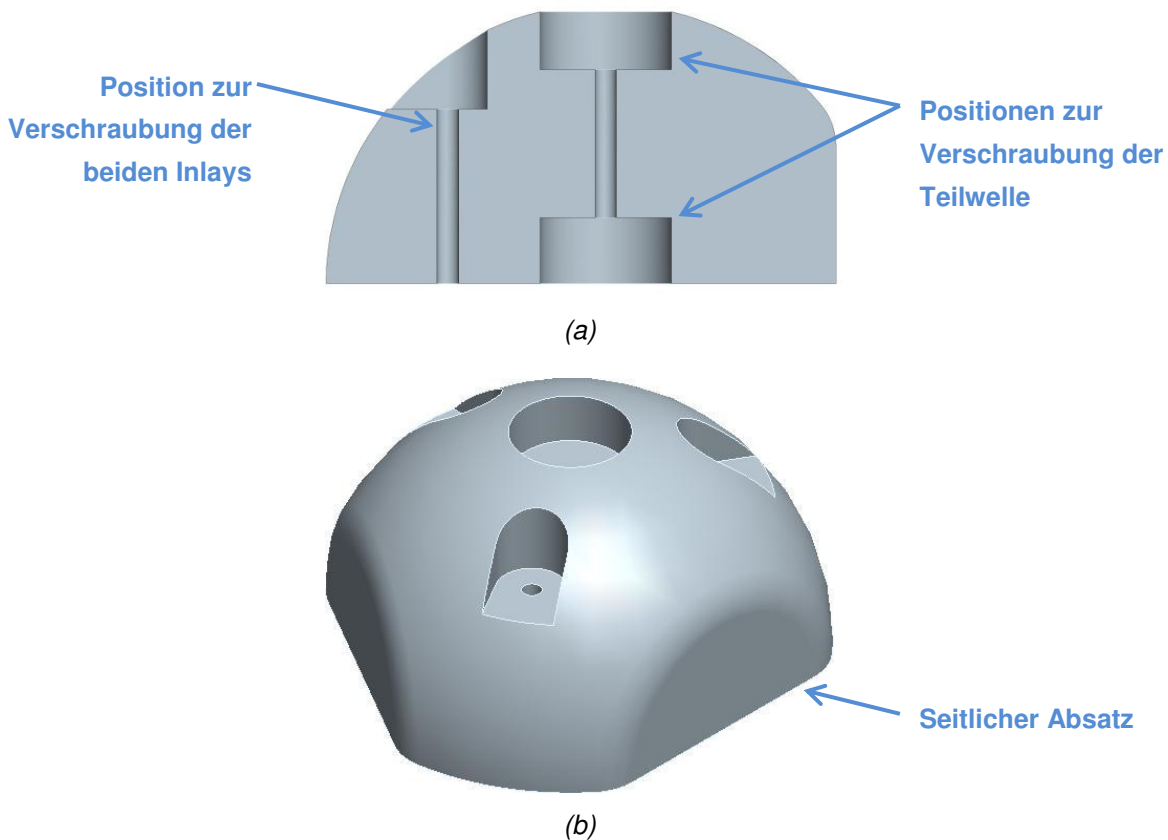
Abbildung 4-16: Variante 3 - innere Sphäre

#### 4.6.3 Ausarbeitung der Vorzugsvariante

Letztendlich wurde eine Entscheidung für die zweite Variante getroffen. Bei den beiden anderen Varianten ist die Bearbeitung der durchgehenden Welle bei diesem geringen Durchmesser und der Gesamtlänge fast nicht möglich. Weiterhin wird durch die Kraftübertragung mittels Langloch-Vierkant die Fertigung der Welle, der Blei-Inlays und der PMMA-Halbschalen nochmals unnötig erschwert. Unter Variante 3 müsste zusätzlich der Bleikern aus einem Bauteil bestehen und nochmals nachbearbeitet werden, was wiederum fertigungstechnisch schwierig ist. Deshalb erfolgt nun die Vertiefung der zweiten Variante, beginnend mit dem Bleikern.

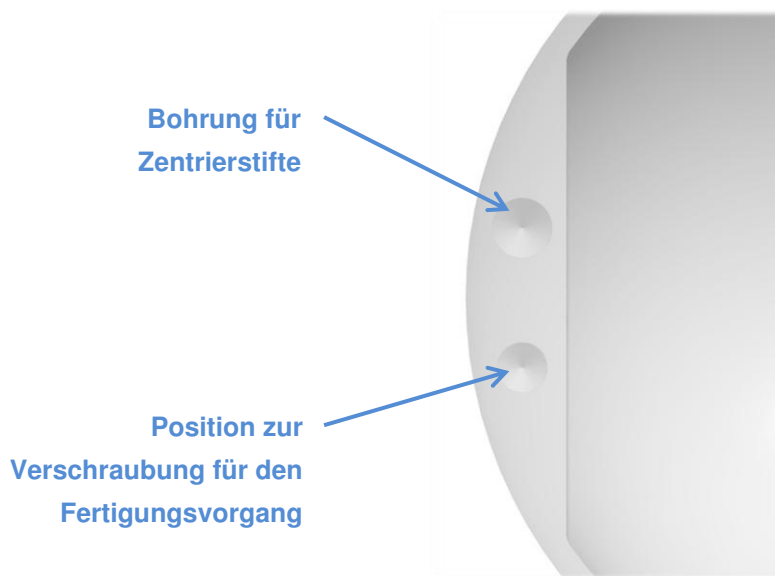


Zur Fertigung des Kerns ist zunächst ein Bleiguss-Bauteil vorgesehen, welches bereits grob die notwendigen Konstruktionselemente beinhaltet. Diese sollen anschließend durch Fräsen im Detail nachgearbeitet werden. Die obere und untere Hälfte des Bleikerns sind von der geometrischen Gestaltung identisch. Auf einem Teilkreis befinden sich drei gleichmäßig verteilte Durchgangsbohrungen zur Verschraubung der beiden Hälften. Diese werden nochmals überfräst, damit die Verschraubung plan aufliegen kann und versenkt ist (siehe (a) Abbildung 4-17). Nur so können die PMMA-Halbschalen ordnungsgemäß mit dem Blei-Inlay verklebt werden. In der Mitte befindet sich für die beiden Teilwellen eine Durchgangsbohrung. Beidseitig wird zusätzlich ein Sackloch eingebracht, wodurch die Verschraubung versenkt werden kann. Damit die Kraft auf die PMMA-Ummantelung übertragen werden kann, wird der Bleikern gegenüber den Positionen zur Verschraubung nochmals gerade abgesetzt (siehe (b) Abbildung 4-17). Die Gewichtskräfte sind nach der Anpassung der Geometrie immer noch ausreichend.



**Abbildung 4-17: Blei-Inlay**

Die PMMA-Halbschalen sind hinsichtlich der inneren Geometrie identisch. Die Wandung beträgt 5 mm. An den drei Absätzen zur Kraftübertragung von Inlay zu Schale werden jeweils eine Bohrung für einen Zentrierstift und eine Gewindebohrung zur Verschraubung untergebracht. Somit können die beiden Halbschalen durch Verkleben und drei Zentrierstifte formschlüssig miteinander verbunden werden (siehe Abbildung 4-18). Zu beachten ist aber, dass die Positionen der Bohrungen an der untern Halbschale vertauscht werden müssen. Die Bohrungen zur Verschraubungen sind für den Fertigungsverfahren angedacht. Durch die Zentrierstifte kann zusätzlich die genaue Positionierung der Bauteile während der Fertigung gewährleistet werden. Hinsichtlich der Fertigung sei noch zu erwähnen, dass die Positionstoleranzen so gering wie möglich gehalten werden müssen, um die Konzentrität der inneren zur äußeren Sphäre zu wahren. Der Aufbau der inneren Sphäre für die Versuchsstadien V2 und V4 ist identisch. Nur die Abmessungen wurden angepasst sowie die Wandung auf 2 mm verringert, damit die Gewichtskraft ausreichend ist. Der obere Wellenteil wird von unten durch die obere Hälfte der äußeren Sphäre geschoben und mit einem Sicherungsring fixiert.



**Abbildung 4-18: Zentrierung der PMMA-Halbschalen**

Im entleerten Zustand des Behälters erfährt der obere Wellenteil durch die innere Sphäre eine Zugkraft. Weiterhin kann es durch Blockieren des Motors und somit der Welle zum Auftreten einer Torsion, bedingt durch das Trägheitsmoment der Kugel, kommen. Deshalb erfolgt nun ein statischer Festigkeitsnachweis nach [RMFS2008]. Die Kennwerte des gewählten Werkstoffes der Welle 1.4301 stammen aus [RMTB2007]. Eine Biegebeanspruchung tritt nicht auf. Ein gleichzeitiges Auftreten der beiden Beanspruchungen ist durchaus möglich, zum Beispiel wenn die innere Sphäre in ersten Test rotiert, ohne dass der

Behälter befüllt ist oder wenn der Behälter mit einem Fluid gefüllt ist, welches eine geringere Dichte als GalnSn besitzt.

$$S_F = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{zd \max}}{R_p}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{t \max}}{\tau_{tF}}\right)^2}} \geq S_{F \min} \quad (4.10)$$

Die maximale Zugspannung  $\sigma_{zd \max}$  ergibt sich aus der Gewichtskraft der inneren Sphäre, die maximale Torsionsspannung  $\tau_{t \max}$  aus dem Trägheitsmoment der Kugel  $J_1$ , der maximalen Winkelfrequenz  $\Omega_{\max}$  und dem Widerstandsmoment  $W_t$ .

$$\sigma_{zd \max} = \frac{m_1 g}{A_{Welle}} \quad (4.11)$$

$$\tau_{t \max} = \frac{T m_{\max}}{W_t} \quad (4.12)$$

$$W_t = \frac{\pi d^3}{16} \quad (4.13)$$

$$T m_{\max} = \frac{1}{2} J_1 \Omega_{\max}^2 \quad (4.14)$$

$$J_1 = \frac{2}{5} m_1 R_1^2 \quad (4.15)$$

$$\tau_{tF} = \frac{1,2 R_p}{\sqrt{3}} \quad (4.16)$$

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Einheit
minimal erforderliche Sicherheit	$S_{Fmin}$	1,5	-
Masse der inneren Sphäre	$m_1$	3,295	kg
Radius der inneren Sphäre	$R_1$	0,045	m
Streckgrenze	$R_e$	190 (da $K_t=1$ )	$\frac{N}{mm^2}$
Winkelfrequenz	$\Omega_{max}$	$\pi$	$s^{-1}$

Tabelle 4-9: Kennwerte zur Berechnung der Welle

Mit den Kennwerten aus Tabelle 4-9 ergibt sich folgende Sicherheit:

$$S_F = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{4,57}{190}\right)^2 + \left(\frac{2,5}{131,6}\right)^2}} = 32 \geq 1,5$$

Der gewählte Durchmesser der Welle sowie die Festigkeit des Werkstoffes sind ausreichend. Da sowohl die Gewichtskraft als auch das Trägheitsmoment der kleineren inneren Sphäre geringer sind, ist die gewählte Konfiguration auch dafür vertretbar. Die gesamte Berechnung befindet sich in den Anlagen Teil F. Welche Momente durch den Drehtisch auf die Welle übertragen werden, ist bisher noch nicht bekannt. Es sollte allerdings versucht werden die Drehzahl nicht schlagartig zu ändern, sondern langsam bis zum gewünschten Wert zu steigern bzw. zu verringern. Abbildung 4-19 zeigt die vormontierte Baugruppe.

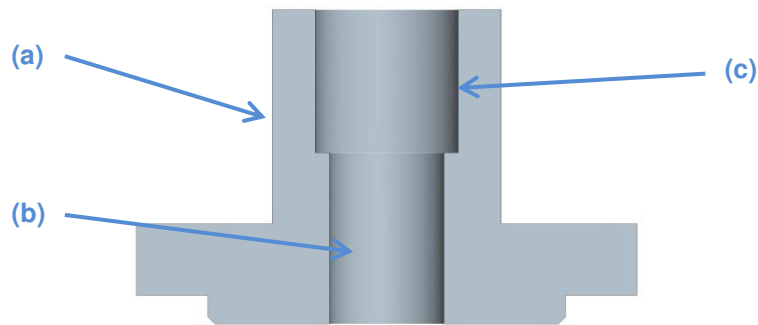


**Abbildung 4-19: Innere Sphäre**

## 4.7 Lagerung der inneren Sphäre

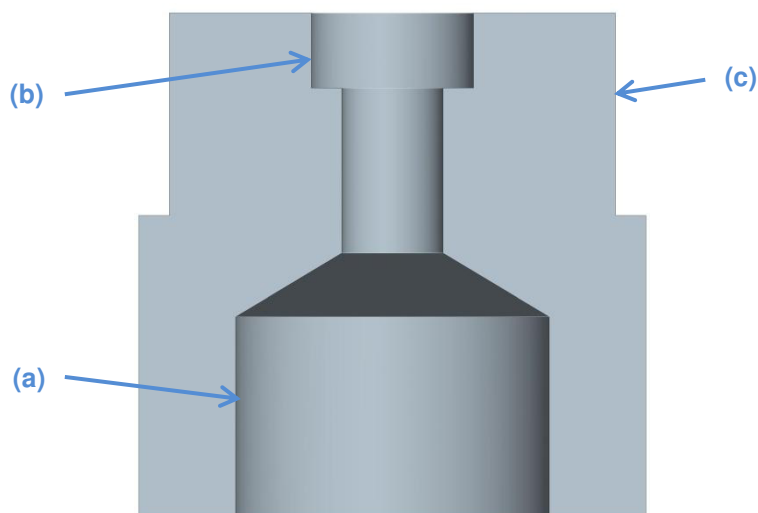
Hinsichtlich der Lagerung der inneren Sphäre wurden der im Abfluss befindliche Lagerpunkt als Loslager und der im Deckel des Ausgleichsbehälters befindliche als Festlager festgelegt. Die bereits ausgewählten Lager können zwar axiale Kräfte aufnehmen, allerdings sind diese nicht ausreichend für den Fall, dass die gesamte Gewichtskraft der inneren Sphäre im geleerten Zustand des Behälters wirksam wird. Deshalb wird am oberen Lagerpunkt, zusätzlich zum Radial-Lager, ein Axial-Lager vorgesehen. Weiterhin muss hier eine Abdichtung der Welle erfolgen. Über den Sicherungsring und eine Distanzhülse wird die Gewichtskraft auf das Axial-Lager übertragen. Am unteren Lagerpunkt ist nur ein Radial-Lager verbaut. Am oberen Lagerpunkt wird zudem die Möglichkeit bestehen, die Welle samt innerer Sphäre nochmals in ihrer Höhe zu verstellen, um somit die beiden Sphären optimal zueinander ausrichten zu können. Dies ist wichtig, da durch die Verschraubung der Welle im Bleikern der Abstand zum oberen Lagerpunkt variieren kann und somit die Konzentrität zu stark abweichen könnte. Die Koaxialität wird hingegen über die Fertigung gewährleistet.

Um die Höhenverstellbarkeit umsetzen zu können, wird der Deckel aus zwei Komponenten bestehen. Die erste Komponente ist der eigentliche Deckel (siehe Abbildung 4-20), der am Ausgleichsbehälter verschraubt wird und diesen somit verschließt. Dieser Deckel besitzt einen Feingewindeabsatz M16x0,5 (a). Entlang der Rotationsachse befindet sich hier eine Durchgangsbohrung für die Antriebswelle (b). Gleichzeitig werden in dieser Bohrung ein Radial-Lager und der Wellendichtring (c) untergebracht.



**Abbildung 4-20: Querschnitt Deckel Ausgleichsbehälter**

Das zweite Bauteil ist eine Überwurfmutter (siehe Abbildung 4-21). Diese besitzt ebenfalls eine Durchgangsbohrung für die Antriebswelle. Von unten wird eine Gewindebohrung (a) vom gleichen Gewindetyp wie der des Absatzes des Deckels eingebracht. Von oben ist die Bohrung nochmals auf die Größe des Axial-Lagers gesenkt (b). Abschließend wurde die Außenkontur der Überwurfmutter 10 mm hoch zu einem Vierkant mit der Schlüsselweite SW 22 nachgearbeitet (c). Die Überwurfmutter kann nun am Gewindeabsatz des Deckels verschraubt werden.

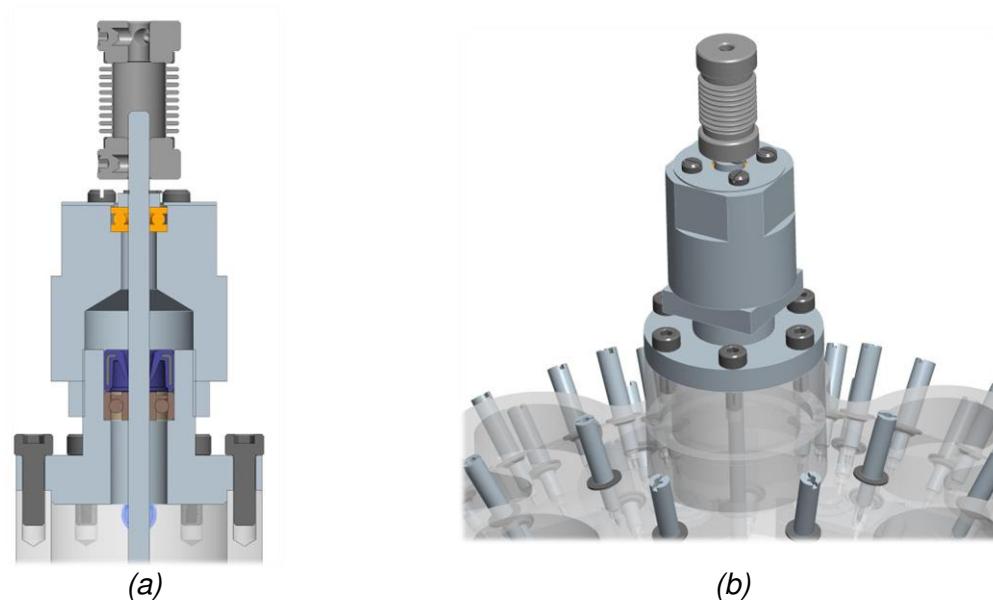


**Abbildung 4-21: Querschnitt Überwurfmutter**

Das Funktionsprinzip ist nun folgendes: die Welle wird von unten durch die äußere Sphäre und die Baugruppe Deckel geschoben. Im Deckel selbst erfolgen die radiale Lagerung sowie die Abdichtung der Welle, in der Überwurfmutter die axiale Lagerung. Durch Ver-

drehen der Überwurfmutter kann nun die Höhe der inneren Sphäre eingestellt werden. Ist die gewünschte Position erreicht, wird die Überwurfmutter durch eine Kontermutter fixiert. Da das gewählte Axial-Lager aus drei Bauteile besteht, muss es mit einem Halteblech in seiner Position gesichert werden.

Über eine Balg-Kupplung nach [ABP2013] der Firma ABP-Antriebe ist die Antriebswelle mit einem Wellenabsatz am oberen Drehtisch verbunden und somit die Kraftübertragung sichergestellt. Diese Balgkupplung kann geringfügige Positionstoleranzen, wie einen Versatz der Rotationsachsen oder einen Winkelversatz, zwischen Behälter und oberem Antrieb kompensieren. Abschließend zu diesem Kapitel ist diese Baugruppe in Abbildung 4-22, im Querschnitt (a) und in einer 3d-Ansicht (b), zu sehen.



**Abbildung 4-22: Baugruppe obere Lagerung der Welle**

## 4.8 Nachrechnung des Versuchsbehälters

Da die Geometrie des Versuchsbehälters nun feststeht, erfolgte eine erneute Berechnung der auftretenden Spannungen und Verschiebungen im Ansys. Weiterhin ist nun die wirkende Gewichtskraft der inneren Sphäre bekannt. Durch die Spannkette zur Verbindung der beiden Halbschalen der äußeren Sphäre wird an dieser Position zusätzlich die Verschiebung in X- und Y-Richtung unterdrückt und eine Gewichtskraft aufgebracht. An der Grundfläche wird die Verschiebung nun nicht an der ganzen Fläche in X- und Y-Richtung verhindert, sondern an den für die Zentrierstifte vorgesehenen Bohrungen. Kapitel 4.8.1

behandelt nochmals die Belastung durch den hydrostatischen Druck. Der Fall, dass der Behälter geleert ist und durch die innere Sphäre eine Gewichtskraft auf die obere Halbschale der äußeren Sphäre wirkt, ist Gegenstand des Kapitels 4.8.2.

#### 4.8.1 Nachrechnung der Belastung durch den hydrostatischen Druck

Im Vergleich zur Berechnung unter Kapitel 4.3.1 hat sich durch die geänderte Geometrie des Behälters die Anzahl der Knoten und Elemente vergrößert. Durch die Spannkette gibt es eine zusätzliche Einspannung des Behälters und wirkende Gewichtskraft (siehe Tabelle 4-10). Alle weiteren Randbedingungen und Kennwerte sind identisch zu denen aus Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3. In den Anlagen Teil G befinden sich alle zur Auswertung der Ansys-Simulation notwendigen Konturplots.

<b>FE-Netz und Elemente</b>	Knotenanzahl	27028
	Elementanzahl	15558
<b>Einspannung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- An Grundfläche eingespannt; nicht in Z verschiebbar und an zwei Bohrungen nicht in X und Y verschiebbar</li> <li>- An der äußeren Fläche der Krempe der beiden Halbschalen; nicht in X und Y verschiebbar</li> </ul>	
<b>Gewichtskraft Spannkette</b>	15 N (wirkt auf Krempe der oberen Halbschale)	

**Tabelle 4-10: Geänderte bzw. zusätzliche Randbedingungen und Festlegungen**

In Tabelle 4-11 sind die hier auftretenden Spannungen und Verschiebungen unter den genannten Bedingungen aufgelistet. Aus den ermittelten Werten geht hervor, dass die maximal zulässige Materialspannung des PMMA nicht überschritten wird. Ebenfalls liegen die Verschiebungen besonders in Z-Richtung deutlich unter der zulässigen Abweichung. Die Maxima der Vergleichsspannungen liegen nun an den Bohrungen der Zentrierstifte. Die Spannungen an den Sensormessplätzen an der Position radial 45° unten wurden im Vergleich zum ersten Berechnungsentwurf nochmals verringert. Schubspannungen sind wiederum kaum vorhanden.



		Spannung $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Schubspannung $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Verschiebung [mm]
<b>X</b>	<b>Min.</b>	-0,0427	-	-0,001079
	<b>Max.</b>	0,1037	-	0,000722
<b>Y</b>	<b>Min.</b>	-0,1004	-	-0,000151
	<b>Max.</b>	0,1307	-	0,000168
<b>Z</b>	<b>Min.</b>	-0,1006	-	-0,002878
	<b>Max.</b>	0,0485	-	0,000123
<b>XY</b>	<b>Min.</b>	-	-0,0646	-
	<b>Max.</b>	-	0,0578	-
<b>XZ</b>	<b>Min.</b>	-	-0,0320	-
	<b>Max.</b>	-	0,0327	-
<b>YZ</b>	<b>Min.</b>	-	-0,0562	-
	<b>Max.</b>	-	0,0557	-

Tabelle 4-11: Spannungen und Verschiebungen am Versuchsbehälter

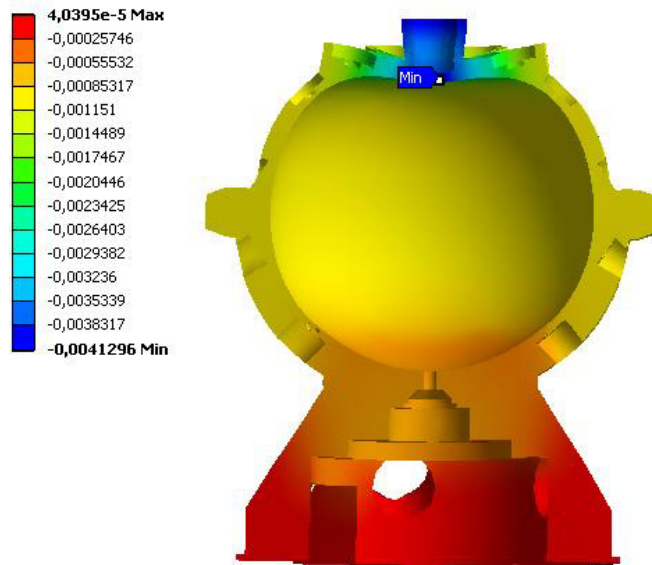
#### 4.8.2 Nachrechnung der Belastung durch die innere Sphäre

Bei dieser Berechnung wurde der Fall betrachtet, dass der Versuchsbehälter geleert ist und somit keine Auftriebskräfte auf die innere Sphäre wirken. Der hydrostatische Druck wird somit während der Berechnung nicht beachtet. Es wirkt aber somit die Gewichtskraft der inneren Sphäre von 33 N auf die Oberfläche des Ausgleichsbehälters. Alle weiteren Randbedingung und Kennwerte stammen aus Tabelle 4-2, Tabelle 4-3 und Tabelle 4-10.

		Spannung $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Schubspannung $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Verschiebung [mm]
<b>X</b>	<b>Min.</b>	-0,1136	-	-0,000453
	<b>Max.</b>	0,0556	-	0,000435
<b>Y</b>	<b>Min.</b>	-0,1151	-	-0,000514
	<b>Max.</b>	0,0446	-	0,000569
<b>Z</b>	<b>Min.</b>	-0,1030	-	-0,004130
	<b>Max.</b>	0,0329	-	0,000040
<b>XY</b>	<b>Min.</b>	-	-0,0282	-
	<b>Max.</b>	-	0,0282	-
<b>XZ</b>	<b>Min.</b>	-	-0,0468	-
	<b>Max.</b>	-	0,0437	-
<b>YZ</b>	<b>Min.</b>	-	-0,0385	-
	<b>Max.</b>	-	0,0421	-

Tabelle 4-12: Spannungen und Verschiebungen - Gewichtskraft innere Sphäre

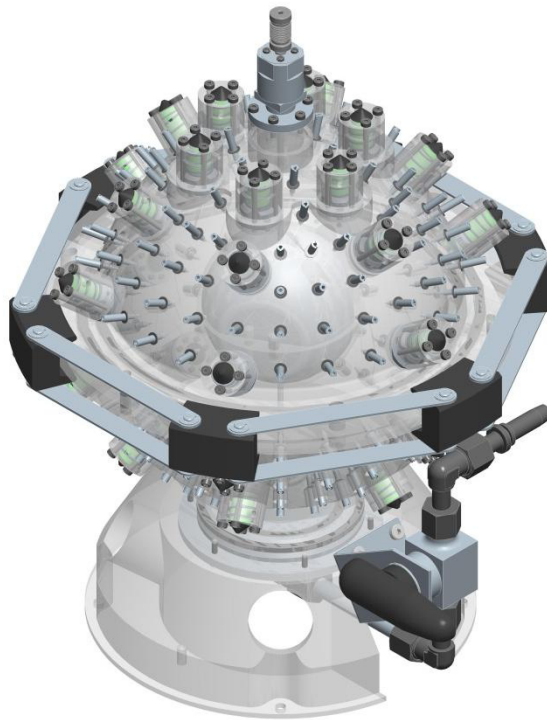
In Tabelle 4-12 sind die auftretenden Spannungen und Verschiebungen aufgelistet. Auch hier liegen alle ermittelten Werte im zulässigen Bereich. In den Anlagen Teil H befinden sich alle zur Auswertung notwendigen Konturplots. Abschließend ist in Abbildung 4-23 die Verschiebung in Z-Richtung zu sehen. Der Behälter verformt sich geringfügig am Boden des Ausgleichsbehälters.



**Abbildung 4-23: Verschiebung in Z-Richtung in mm - Gewichtskraft innere Sphäre**

## 4.9 Fertigung des Versuchsbehälters

Aufgrund der geforderten Genauigkeit, der anspruchsvollen Geometrie und der zu bearbeitenden Werkstoffe sollte die Fertigung der äußeren und inneren Sphäre extern erfolgen. Für die Fertigung der äußeren Sphäre wurde die Firma PTZ-Prototypenzentrum GmbH aus Dresden ausgewählt. In Zusammenarbeit wurden die Fertigungsmöglichkeiten diskutiert und die Konstruktion daran angepasst. Aufgrund begrenzter räumlicher Gegebenheiten und verfügbarer Werkstoffabmaße des PMMA musste nochmals die äußere Sphäre verändert werden. An der oberen Halbschale wurde der Ausgleichsbehälter als zusätzliches Bauteil gestaltet. Die untere Komponente der Sphäre wurde ebenfalls unterteilt in untere Halbschale und einen Fuß. Die Halbschalen wurden so angepasst, dass sie mit den drei Zentrierbohrungen ausgerichtet und mit zusätzlichen Bohrungen beide an einer Spannvorrichtung befestigt werden können. Weiterhin wurde ein möglicher Fertigungsablauf ausgearbeitet. Dieser ist am Beispiel der unteren Halbschale in den Anlagen Teil I erläutert. Darüber hinaus übernahm diese Firma ebenfalls die Fertigung der beiden inneren Sphären samt Bleikerne. Alle weiteren Bauteile wurden in der hauseigenen Werkstatt gefertigt. Die Stück- und Bestelllisten befinden sich in den Anlagen Teil K. In den Anlagen Teil M befinden sich alle zur Fertigung und zum Aufbau notwendigen Zeichnungen. Abschließend zum Kapitel 4 ist der komplette Aufbau des Versuchsbehälters in Abbildung 4-24 zu sehen. Eine Baugruppenzeichnung des Versuchsbehälters ist in den Anlagen Teil L zu sehen.

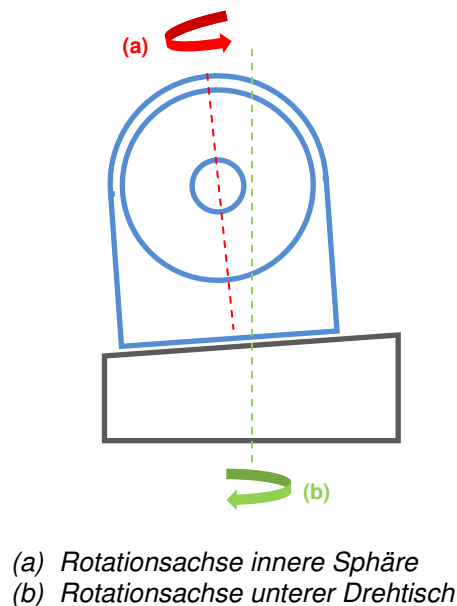


**Abbildung 4-24: Modell des kompletten Aufbaus des Versuchsbehälters**

## 5 Justiereinheit

### 5.1 Allgemeines

In den Versuchsstadien V2 und V4 wird zusätzlich zur Rotation der inneren Sphäre die äußere Sphäre durch den unteren Drehtisch in Rotation gebracht. Dabei muss aber die Koaxialität der inneren Sphäre zum unteren Drehtisch gewährleistet werden. Im schlechtesten Fall würde der Behälter eine Kreiselbewegung ausführen. Die Problematik wird in Abbildung 5-1 verdeutlicht.



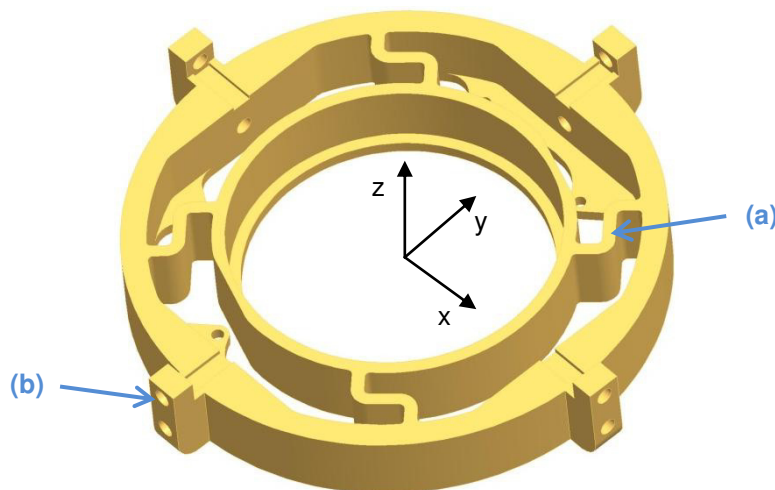
**Abbildung 5-1: Rotationsproblem des Versuchsbehälters [PBBG2013]**

Um die mögliche Neigung und den Versatz des Behälters zum Drehtisch korrigieren zu können, wird zwischen diesen beiden Komponenten eine Justiereinheit vorgesehen. Bei der Recherche nach verwendbaren Einheiten, die kommerziell erwerblich sind, wurde aufgrund des geringen verfügbaren Platzes und der geometrischen Anforderungen keine verwendbare Lösung gefunden. Weiterhin sind diese Einheiten in ihren Justiermöglichkeiten für diesen Anwendungsfall überdimensioniert.

## 5.2 Aufbau

Der Aufbau basiert auf der Idee, die Verschiebung über Stellschrauben und das Rückformvermögen eines geeigneten Werkstoffes zu ermöglichen. Die Neigung soll ebenfalls über Stellschrauben, die das Kippen einer Platte verursachen, einstellbar sein.

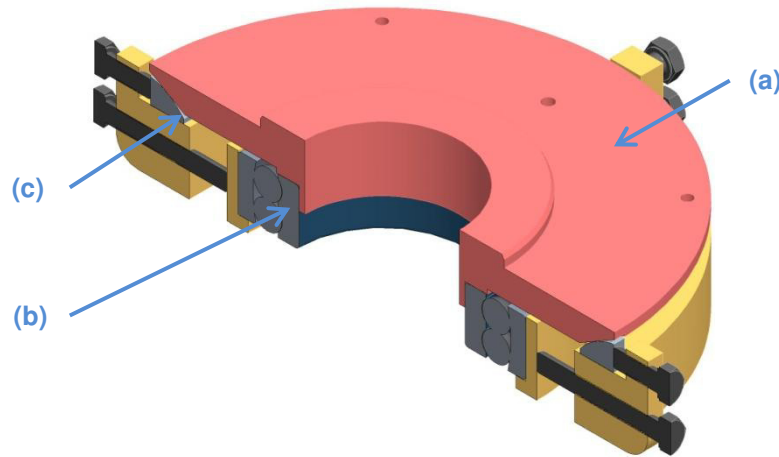
Die Baugruppe wird aus fünf verschiedenen Komponenten bestehen. Über das Grundelement (siehe Abbildung 5-2) wird die Justiereinheit am Drehtisch befestigt. Dabei sind die gleichen Schnittstellen wie am Fuß des Versuchsbehälters vorgesehen. Das Bauteil besteht im Grunde genommen aus zwei Ringen, die über vier dünne s-förmige Stege (a) miteinander verbunden sind. Weiterhin sind vier Positionen (b) à zwei Feingewindebohrungen für die notwendigen Stellschrauben vorgesehen. Die unteren dienen zur Verschiebung des inneren Ringes in positive und negative X- und Y-Richtung. Dabei ist zu beachten, dass gegenüberliegende Stellschrauben immer gleichzeitig entgegengesetzt zu verstellen sind. Wird die Streckgrenze des Werkstoffes nicht überschritten, richtet sich der innere Ring nach Entlasten der Stellschrauben immer wieder zentrisch aus.



**Abbildung 5-2: Grundelement der Justiereinheit**

Im inneren Ring ist ein Pendelkugellager montiert. Als nächstes Bauteil wird in den Innenring des Lagers der rohrförmige Absatz einer Platte geschoben (siehe Abbildung 5-3). Diese Platte kann nun durch das Lager um die X- und Y-Achse geneigt werden. Dabei wird die Platte (a) immer um den Mittelpunkt des Lagers (b) geneigt. Die Neigung erfolgt über die Stellschrauben, die sich in den oberen Bohrungen der vier Positionen befindet. Über die Schrauben werden Keile (c) an die abgeschrägte Unterseite der Platte geschoben und diese somit in ihrem Winkel verändert. Die Keile werden in einer Nut am Grundelement und einer Nut an der Platte geführt und verhindern somit ein unerwünschtes Ver-

drehen der Platte zum Grundelement. Bei der Neigungseinstellung gilt selbiges wie bei der Verschiebung. Gegenüberliegende Stellschrauben müssen immer gleichzeitig entgegengesetzt verstellt werden. Der Behälter wird letztendlich auf der Platte verschraubt. Bei der Montage wird die Justiereinheit zuerst in ihre Grundstellung gebracht.



**Abbildung 5-3: Schnittansicht Justiereinheit**

Über das Durchgangsloch in der Platte kann in den Versuchsstadien V3 und V4 die Verkabelung hin zum Schleifring hergestellt werden. Um den Schleifring mit der Justiereinheit und dem Versuchsbehälter zu koppeln, wird zwischen den zuletzt genannten Komponenten ein Mitnehmer-Blech montiert.

### 5.3 Nachrechnung der Justiereinheit

Die Nachrechnung erfolgte wiederum im Ansys. Dabei wurde eine Verschiebung an den Punkten, an denen die Stellschrauben auf den Innenring wirken, simuliert, also eine gleichzeitige Verschiebung in X- und Y-Richtung. Das Modell besteht aus zwei Bauteilen. Im Grundelement wird ein zusätzlicher Ring montiert. Dieser simuliert die Widerstandskraft des Lagers und besteht aus Stahl. Für das Grundelement wurde die Messinglegierung CuZn39Pb2 ausgewählt, da dieser Werkstoff gut spanend bearbeitbar ist und zudem eine hohe Dehngrenze besitzt. In Tabelle 5-1 sind die benötigten Werkstoffkennwerte und in Tabelle 5-2 Festlegungen und Randbedingungen aufgelistet.

<b>Dichte</b>	8450	$\frac{kg}{m^3}$
<b>E-Modul</b>	120000	$\frac{N}{mm^2}$
<b>Querkontraktionszahl</b>	0,37	
<b>Schubmodul</b>	43796	$\frac{N}{mm^2}$
<b>Max. Dehngrenze</b>	370	$\frac{N}{mm^2}$

Tabelle 5-1: Werkstoffkennwerte CuZn39Pb2 [DKI2013]

<b>Annahme</b>	Drehtisch ist Auflager und unendlich steif	
<b>FE-Netz und Elemente</b>	Knotenanzahl	25807
	Elementanzahl	14036
	Elementgröße	programmgesteuert
<b>Netzerzeugung</b>	Automatische Elementgrößen- und Typzuweisung	
<b>Einspannung</b>	an Grundfläche eingespannt; nicht in Z verschiebbar und an zwei Bohrungen nicht in X und Y verschiebbar	
<b>Gewählte Verschiebung</b>	0,15 mm in X und Y an den Punkten, an denen die Stellschrauben auf den Innenring wirken	

Tabelle 5-2: Berechnung Justiereinheit - Festlegungen und Randbedingungen

In Abbildung 5-4 sind die Randbedingungen der Justiereinheit dargestellt. Das Bauteil ist an der Grundfläche nicht in Z-Richtung verschiebbar (A). Weiterhin ist es an den beiden Bohrungen für die Zentrierstifte in X- und Y-Richtung eingespannt (B). Die Verschiebung des Innenrings wird an den Flächen, an denen die Stellschrauben auf den Innenring wirken, angetragen (C und D). Bei der Untersuchung wurden nun die Verschiebungen variiert und dabei beobachtet, ob die auftretenden Spannungen die Dehngrenze des Werkstoffes überschreiten. Bei einer gleichzeitigen Verschiebung in X- und Y-Richtung werden die maximalen Spannungen erwartet.



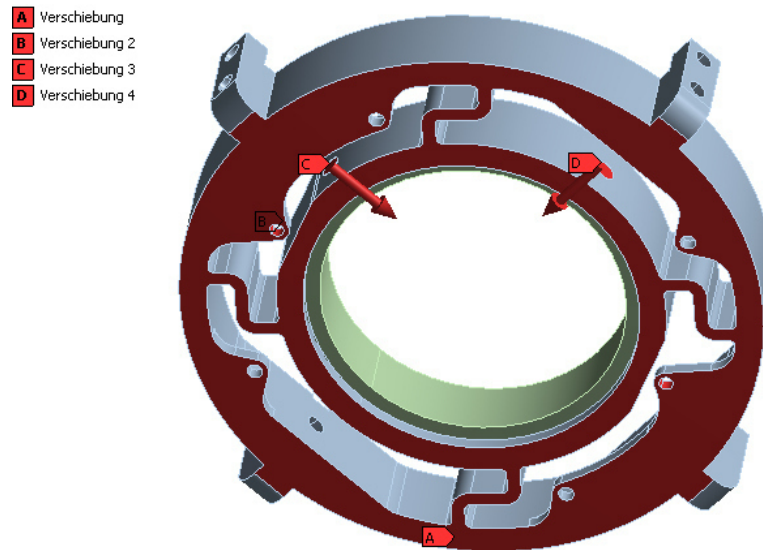


Abbildung 5-4: Justiereinheit - Randbedingungen

		Spannung $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Schubspannung $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Verschiebung [mm]
X	Min.	-343,2	-	-0,001079
	Max.	218,4	-	0,000722
Y	Min.	-220,8	-	-0,000151
	Max.	240,3	-	0,000168
Z	Min.	-132,7	-	-0,002878
	Max.	110,9	-	0,000123
XY	Min.	-	-184,8	-
	Max.	-	204,6	-
XZ	Min.	-	-22,7	-
	Max.	-	36,7	-
YZ	Min.	-	-26,4	-
	Max.	-	26,2	-

Tabelle 5-3: Spannungen und Verschiebungen an der Justiereinheit

Letztendlich wurde eine gleichzeitige maximale Verschiebung in X- und Y-Richtung von 0,15 mm ermittelt. Die vorhandenen Spannungen (siehe Tabelle 5-3) treten wie erwartet an den Übergängen der Stege zum Außenring des Bauteils auf. Zusätzlich gibt es an den Bohrungen der Zentrierstifte große Spannungen. Durchaus wäre auch eine größere Verschiebung möglich, aber die maximale Vergleichsspannung an den Bohrungen liegt sehr knapp unter der Dehngrenze des Werkstoffes (siehe Abbildung 5-5). Alle weiteren Konturplots befinden sich in den Anlagen Teil J.

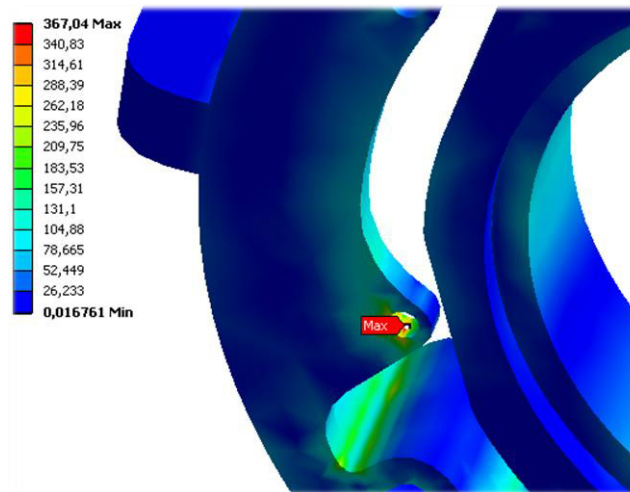


Abbildung 5-5: Justiereinheit - Vergleichsspannung in  $\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$

## 6 Gestell

### 6.1 Allgemeines

Die letzte Baugruppe des Versuchsaufbaus ist das Gestell, an welchem ein Großteil der Komponenten des Experiments montiert und somit in ihren definierten Lagebeziehungen zueinander fixiert werden. Im ersten Entwurf (siehe Abbildung 6-1) bestand das Gestell aus verschweißten Vierkantprofilen. An den vier Gestellfüßen sind wiederum zwei Platten zur Lagerung der Spulen befestigt. Zur Montage der unteren Spule und des Versuchsbehälters kann der obere Teil des Gestells inklusive des oberen Drehtisches abgenommen werden. Allerdings kann mit dieser Variante die Längenausdehnung der Spulen, bedingt durch die Erwärmung, nicht kompensiert werden. Das Gestell würde sich verformen und somit die Lagebeziehungen, besonders zwischen Spulen und Versuchsbehälter, verändern. Weiterhin ist die Fertigung des Gestells bei der gewünschten Genauigkeit aufwendig. Für nachträgliche Änderungen oder Anbauten wäre diese Variante ebenfalls unpraktisch.

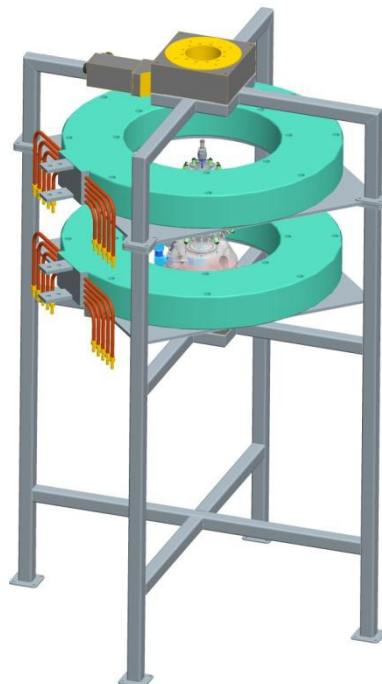


Abbildung 6-1: Gestell - erster Entwurf

Deshalb wurde letztendlich ein Profil-System der Firma Rose & Krieger ausgewählt. Ein Großteil der Komponenten besteht zwar aus Aluminium, aber durch eine Pulverbeschichtung kann die Reaktionsfreudigkeit mit dem Fluid unterdrückt werden. Der Aufbau wird außerdem in ein inneres und äußeres Gestell unterteilt. Somit können sich die Spulen ausdehnen, ohne den Behälter zu beeinflussen. Alle soeben aufgezählten Nachteile des Gestells sind mit diesen Änderungen behoben.

## 6.2 Ausarbeitung des Gestells

Am inneren Gestell (siehe Abbildung 6-2) werden der obere und untere Drehtisch (a) samt Versuchsbehälter montiert. Weiterhin ist eine Zwischenebene für den Schleifring (b) vorgesehen. Die einzelnen Profile werden pulverbeschichtet und mit Spannverbindern aus dem Standardprogramm [RKPS2013] der Firma Rose & Krieger miteinander verbunden. Über Gelenkfüße besteht die Möglichkeit, das Gestell in seiner Höhe und Neigung nochmals nachzustellen. Am inneren Gestell ist zusätzlich ein Arbeitsbereich (c), bestehend aus zwei Ablageplatten, vorgesehen. Alle montierten Platten bestehen aus Pertinax. Über Fundamentwinkel (d) werden die vier Gestellfüße jeweils an einer Fußplatte befestigt. Diese Fundamentwinkel ermöglichen, neben der Höhen- und Neigungsverstellung durch die Gelenkfüße, eine Verschiebung des gesamten inneren Gestells.

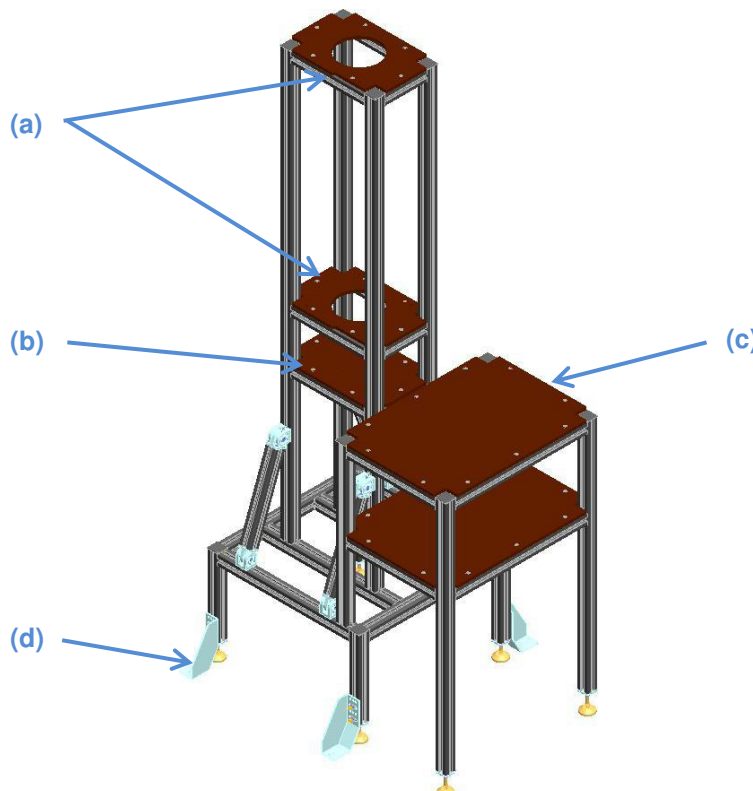


Abbildung 6-2: Inneres Gestell

Das äußere Gestell (siehe Abbildung 6-3) ist für die Positionierung der beiden Spulen am Versuchsaufbau verantwortlich. Es wird ebenfalls über Fundamentwinkel mit den Fußplatten (a) verbunden. Die beiden Gestelle können somit optimal zueinander ausgerichtet und danach fixiert werden. Die beiden für die Spulen vorgesehenen Positionen (b) sind vom Aufbau her identisch. Die vier Gestellfüße sind dabei nicht mit einem durchgängigen Profil miteinander verbunden, sondern in der Mitte unterbrochen. Durch einen Metall-Gummi-Puffer (c) werden die beiden Profilabschnitte miteinander verknüpft. Ebenfalls gibt es anstatt einer Ablageplatte vier Stück pro Spulen-Position, jeweils eine pro Gestellfuß. Die Spulen sind mit den Ablageplatten verschraubt. Durch die Metall-Gummi-Puffer sollen die auftretenden Verschiebungen, die durch die Wärmeausdehnung der Spule entstehen, kompensiert werden können. Die vier Gestellfüße nehmen die dadurch auftretenden Kräfte auf. Die Auflagepositionen der Spulen werden nochmals in einem Winkel von  $45^\circ$  ausgesteift. Nach ( 6.1 ) ergibt sich für die Spulen eine Vergrößerung von 0,32 mm in Richtung des Radius bei einem Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  von  $16,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  und einer Erhöhung der Temperatur während des Betriebes auf  $70^\circ \text{C}$ .

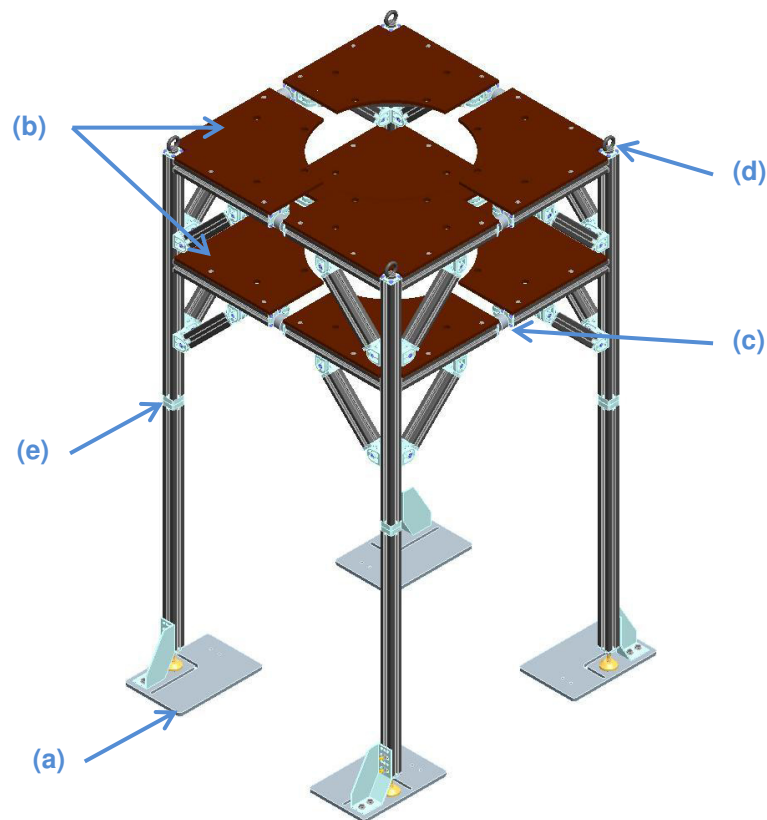
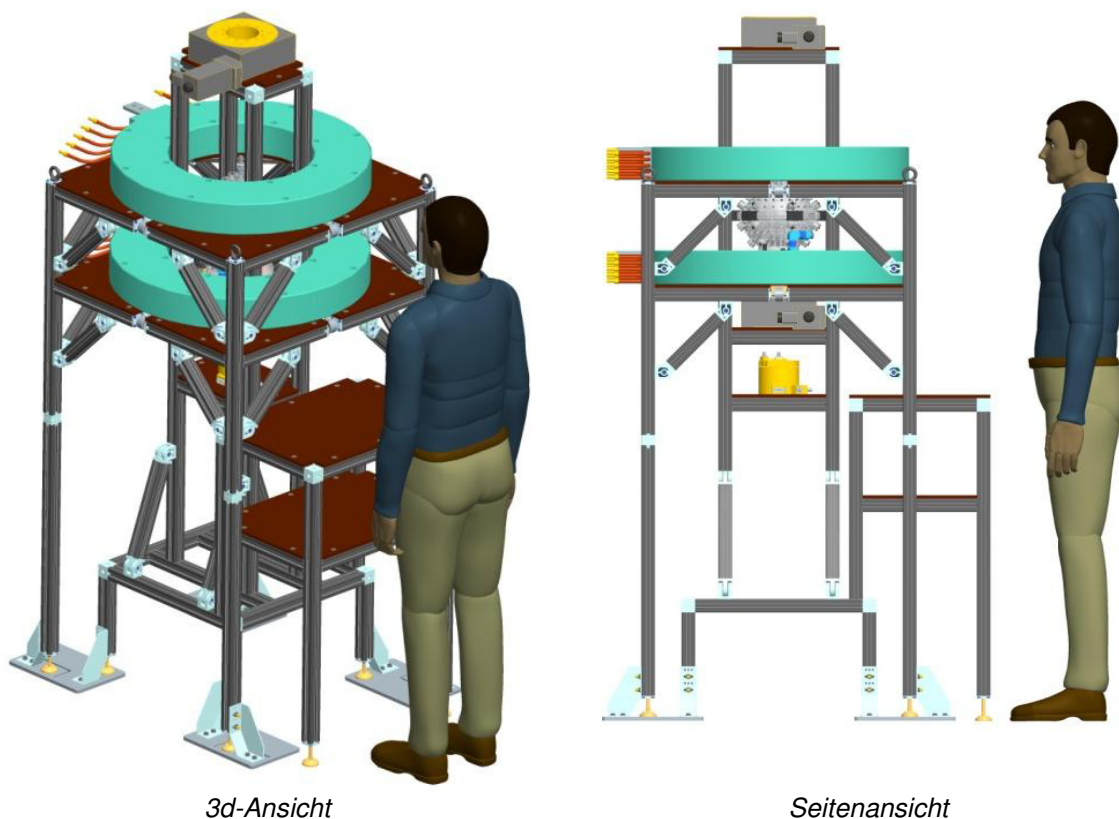


Abbildung 6-3: Äußeres Gestell

$$\Delta d = \alpha \times \Delta T \times d \quad (6.1)$$

Das Gestell selbst ist nochmals getrennt, sodass der obere Teil über die vier Ringschrauben (d) abgehoben werden kann, um somit zum Beispiel Arbeiten am Versuchsbehälter durchführen zu können. Die Verbindung zum unteren Teil erfolgt über Stirnverbinder (e).

Für die ausgearbeitete Variante des gesamten Gestells mussten allerdings die Wasseranschlüsse der Spulen angepasst werden. Da sie noch nicht gefertigt waren, konnte dies mit dem Hersteller abgeklärt werden. Die Nuten der Profile werden durch Profilabdeckungen verschlossen, sodass auch kein GalnSn in die Nuten gelangen könnte. Am wichtigsten bei der Ausrichtung der beiden Gestelle ist die Lagebeziehung des Versuchsbehälters zu den beiden Spulen. Die Zeichnungen zur Baugruppe Gestell komplettieren den in den Anlagen Teil M befindlichen Zeichnungssatz des Versuchsaufbaus. Die Bestelllisten befinden sich in den Anlagen Teil K. Abschließend zur Konstruktion ist in Abbildung 6-4 ein Modell des gesamten Versuchsaufbaus zu sehen. In den Anlagen Teil L befindet sich die Baugruppenzeichnung des gesamten Versuchsaufbaus.



**Abbildung 6-4: Modell des gesamten Versuchsaufbaus**

## 7 Anleitung für Montage- und Befüllvorgang

### 7.1 Anleitung für den Montagevorgang

Zunächst ist der Versuchsbehälter teilweise vorzumontieren. Bei der Erstmontage sind der Ausgleichsbehälter und die PMMA-Befestigungsringe der UDV-Sensorhalterungen an ihren vorgesehenen Positionen einzukleben. Ebenso muss die untere Halbschale der äußeren Sphäre mit dem Fuß verklebt werden. Weiterhin ist bei der Erstmontage die Lagerhalterung im Abfluss zu verschrauben. Danach wird im Fuß der Deckel samt Dichtungen und Rohrleitungen befestigt. Die Baugruppe des oberen Deckels kann ebenfalls am Ausgleichsbehälter verschraubt werden. Die innere Sphäre wird auch vormontiert. Abschließend sind die Potentialmesssonden zu platzieren.

Danach beginnt die eigentliche Installation des Versuchsaufbaus. Das innere Gestell wird zunächst an den Fußplatten verschraubt. Danach werden die beiden Drehtische inklusive Neigungseinheit und der Schleifring am Gestell montiert. Die untere Halbschale der äußeren Sphäre kann nun platziert werden. Danach wird die Welle der inneren Sphäre durch die obere Halbschale geschoben und von oben mit dem Sicherungsring gesichert. Diese Einheit wird dann an der unteren Halbschale montiert und durch die Spannkette fixiert. Von oben kann nun durch den oberen Drehtisch die verlängerte Antriebswelle geschoben und an der Kupplung verschraubt werden. Damit ist der Aufbau des inneren Gestells und des Versuchsbehälters abgeschlossen.

Danach wird der untere Teil des äußeren Gestells ebenfalls an den Fußplatten verschraubt. Der andere Teil wird separat montiert. Dazu wird zunächst die untere Spulenposition aufgebaut und die erste Spule befestigt. Danach kann die obere Spule in der gleichen Art und Weise angebaut werden. Diese Einheit wird nun per Kran an den Versuchsaufbau gehoben und mit den Stirnverbindern am Rest des äußeren Gestells verschraubt. Abschließend kann die Ausrichtung der beiden Gestelle zueinander bzw. des Versuchsbehälters zu den Spulen erfolgen. Sind Arbeiten am Versuchsbehälter durchzuführen, wird der obere Teil des äußeren Gestells, nach Lösen der Stirnverbinder, vom Versuchsaufbau abgehoben. Bei einem Wechsel der inneren Sphäre wird diese ebenfalls an der anderen oberen Halbschale vormontiert und somit lediglich die gesamte Einheit getauscht.

## 7.2 Anleitung für den Befüllvorgang

Vor der Montage des Versuchsbehälters sind dessen Innenseiten und die innere Sphäre gründlich mit GaInSn einzureiben, um einen besseren Kontakt zwischen dem Fluid und dem PMMA herstellen zu können. Es ist dabei auf die Spitzen der Potentialmesssonden zu achten. Bei der ersten Inbetriebnahme oder einem Wechsel der inneren Sphäre ist der Versuchsbehälter zunächst durch die Argonleitung und die GaInSn sorgfältig mit Argon zu spülen, damit im System keine Luft vorhanden ist. Ist der Behälter komplett mit Argon geflutet, kann die Zuleitung unterbrochen und der Behälter nun mit GaInSn bis zur Markierung am Ausgleichsbehälter gefüllt werden. Wird der Behälter geleert, ist dieser wiederum zeitgleich mit Argon zu füllen. Bei der Demontage der Bauteile, die in direktem Kontakt mit dem Fluid stehen, ist eine gründliche Reinigung notwendig. Hierbei ist wiederum auf die Spitzen der Sonden zu achten.



## 8 Fazit

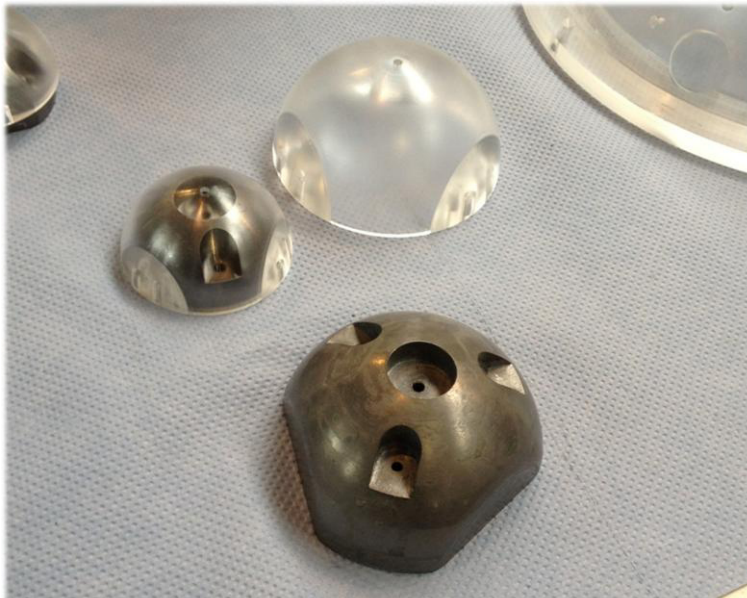
Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass alle Forderungen der Aufgabenstellung ausreichend untersucht und erfüllt wurden. Es wurde zum einen der gesamte konstruktive Aufbau des Behälters und des Gestells erarbeitet. Dabei wurden für einzelne Komponenten verschiedene Varianten entwickelt und miteinander verglichen. So zum Beispiel die Varianten zur Befestigung der UDV-Sensoren, die sogar gefertigt und in einem Test praktisch untersucht und verglichen wurden. Für verschiedene Bauteile wurden zur Auslegung diverse Berechnungen durchgeführt. Die konstruktive Auslegung mündete letztendlich in der Erstellung des gesamten Zeichnungssatzes der Konstruktion. Zum anderen erfolgte anschließend die Betreuung der externen sowie internen Fertigung bis hin zu ersten Montagevorgängen am Versuchsbehälter.

Mit Hinsicht auf die Neigungseinheit sollte nochmals überprüft werden, welche Abweichungen tatsächlich am Aufbau vorhanden sind. Gegebenenfalls muss die Einheit nochmals überarbeitet bzw. ein anderer Werkstoff ausgewählt werden. Für die ersten drei Versuchsstadien ist diese Einheit nicht notwendig, sodass der Aufbau zunächst ohne diese Einheit erfolgen kann.

Die bisher gefertigten Bauteile wurden auf ihre Kompatibilität geprüft und es wurden bisher keine Mängel festgestellt, die die Montage behindern würden. Abschließend ist in Abbildung 8-1 der bereits gefertigte Behälter und in Abbildung 8-2 die beiden inneren Sphären zu sehen. Nachfolgend kann nun nach Lieferung und Fertigung aller noch benötigten Teile der gesamte Versuchsstand aufgebaut werden. Anschließend sollte, vor Beginn der eigentlichen Versuche, die Funktionstüchtigkeit des gesamten Aufbaus überprüft werden. Bevor mit den Versuchsstadien V1 bis V4 begonnen werden kann, sind unter V0 erste Tests, mit Wasser als Fluid und ohne die beiden Spulen, durchzuführen.



**Abbildung 8-1: Gefertigter Behälter**



**Abbildung 8-2: Innere Sphären**

## Literatur

- [ABP2013] ABP-Antriebe: Balgkupplungen.  
URL: <http://www.abp-antrieb.de/kupplungen/balgkupplungen/bkbs-1222.html>,  
verfügbar am 01.09.2013, 13.05 Uhr
- [DKI2013] Deutsches Kupferinstitut: Werkstoffdatenblatt CuZn39Pb2.  
URL: [http://www.kupferinstitut.de/front\\_frame/pdf/CuZn39Pb2.pdf](http://www.kupferinstitut.de/front_frame/pdf/CuZn39Pb2.pdf),  
verfügbar am 03.12.2013, 22.00 Uhr
- [ETDP2013] Evonik Industries: Technische Daten Plexiglas.  
URL: <http://www.plexiglas.de/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/PLEXIGLAS-Sheet/PLEXIGLAS/211-1-PLEXIGLAS-GS-XT-de.pdf>,  
verfügbar am 05.08.2013, 11:25 Uhr
- [EVAC2013] EVAC- Vacuum: EVAC ISO Tapered chain clamps.  
URL: <http://www.evacvacuum.com/index.php?id=162>,  
verfügbar am 29.10.2013, 11.05 Uhr
- [HFD2013] Hansa-flex: O-Ring Dichtungen.  
URL: <http://cat.hansa-flex.com/de/product/906402>,  
verfügbar am 18.10.2013, 14.30 Uhr
- [HFL2013] Hansa-flex: Leitungstechnik-Rohrverschraubungen 24° DIN 2353.  
URL: <http://cat.hansa-flex.com/de/cat/3>,  
verfügbar am 20.10.2013, 11.40 Uhr

- [HYL2013] Hy-lok: 2-Wege Absperrventil-Serie 112.  
URL: <http://valvesandfittings.hylokusa.com/product/112-series-ball-valves/y-lok-112-series-ball-valves-2-way-shut-off-valv-2?&plpver=1006>,  
verfügbar am 18.10.2013, 15.00 Uhr
- [HZDR2013] Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf: Über uns.  
URL: <http://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=139>,  
verfügbar am 29.10.2013, 11.20 Uhr
- [MFSS2000] Hollerbach, Rainer: "Magnetohydrodynamic flows in spherical shells". Physics of rotating fluids, Springer Verlag, Vol. 549, 2000, S. 295-316
- [NIMSC2009] Hollerbach, Rainer: „Non-axisymmetric instabilities in magnetic spherical Couette flow“. Proceedings of the royal society A, Vol. 465, 2009, S. 2003-2013
- [PBBG2013] Gohl, Benjamin: "Praktikumsbericht". Voruntersuchungen "Spherical Couette". Dresden-Rossendorf: HZDR intern, 2013
- [RMFS2008] Wittel, Herbert; Muhs, Dieter; Jannasch, Dieter; Voßiek Joachim: „Roloff/Matek Maschinenelemente“. Formelsammlung. – 9. Aufl. – Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2008
- [RMTB2007] Muhs, Dieter; Wittel, Herbert; Jannasch, Dieter; Voßiek Joachim: „Roloff/Matek Maschinenelemente“. Tabellen. – 18. Aufl. – Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2007

- [RKPS2013] Rose & Krieger: Blocan Alu-Profilsysteme – Gesamtkatalog.  
URL: [http://www.rk-rose-krieger.com/fileadmin/catalogue/profil-technik/bl\\_blocan\\_profilsysteme\\_dgb.pdf](http://www.rk-rose-krieger.com/fileadmin/catalogue/profil-technik/bl_blocan_profilsysteme_dgb.pdf),  
verfügbar am 01.09.2013, 13.05 Uhr
- [SAB2013] Schneider-Ass: Blei-Produkte nach Zeichnung.  
URL: [http://www.schneider-ass.de/de/strahlenschutz\\_nachzeichnung.htm](http://www.schneider-ass.de/de/strahlenschutz_nachzeichnung.htm),  
verfügbar am 12.08.2013, 10.45 Uhr
- [SCES2013] Seilmayer, Martin; Gohl, Benjamin: „The spherical Couette Experiment“. Specification of the construction.  
Dresden-Rosendorf: HZDR intern, 2013
- [SIPR2013] Signal-Processing: UDV technique-background.  
URL: [http://www.signal-processing.com/intro\\_udv.html](http://www.signal-processing.com/intro_udv.html),  
verfügbar am 16.11.2013, 14.00 Uhr
- [SLRC1923] Taylor, Geoffrey Ingram: „Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders“. Philosophical transactions of the Royal Society of London, Vol. 223; 1923, S. 289-343
- [TDYN2010] Stierstadt, Klaus : „Thermodynamik“. Springer-Lehrbuch.  
Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2010, S. 432
- [TEO2011] Travníkov, Vadim; Eckert, Kerstin; Odenbach, Stefan: „Influence of an axial magnetic field on the stability of spherical Couette flows with different gap widths“. Acta Mechanica, Springer-Verlag, Vol. 707 , 2011, S. 255-268

- [VATC2010]     Bernhardt, Karl-Heinz: „Vacuum Technology“; Compendium.  
                    Asslar: Pfeiffer Vacuum GmbH, 2010, S. 104-119

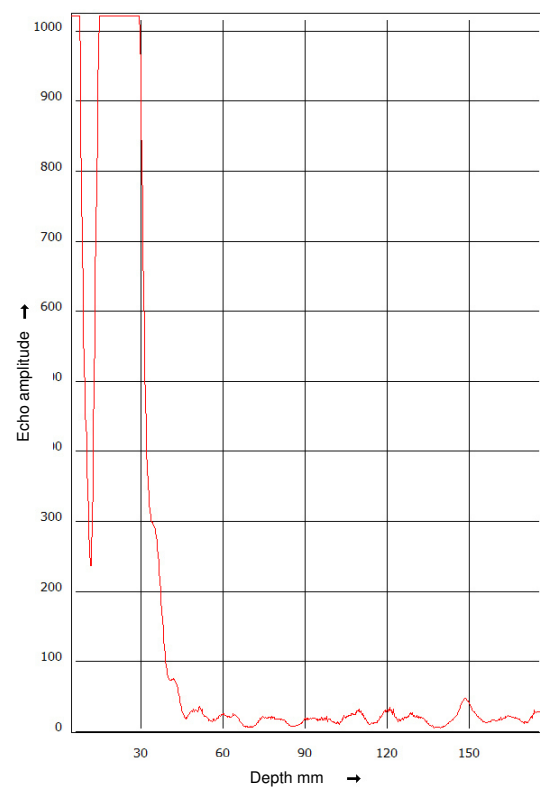
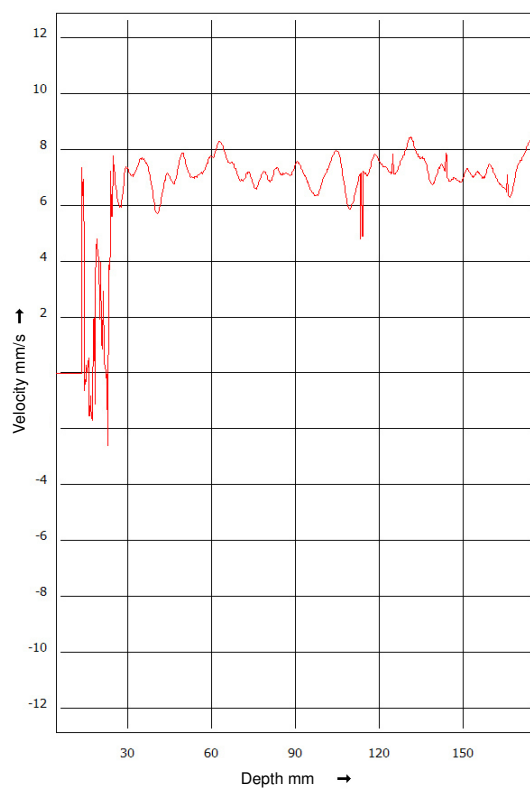
## Anlagenverzeichnis

Anlagen, Teil A .....	A-I
Anlagen, Teil B .....	A-VII
Anlagen, Teil C .....	A-IX
Anlagen, Teil D .....	A-XV
Anlagen, Teil E .....	A-XVII
Anlagen, Teil F .....	A-XXI
Anlagen, Teil G .....	A-XXV
Anlagen, Teil H .....	A-XXXI
Anlagen, Teil I .....	A-XXXVII
Anlagen, Teil J .....	A-XLIII
Anlagen, Teil K .....	A-XLVII
Anlagen, Teil L .....	A-LIII
Anlagen, Teil M .....	Siehe Anlagenbeiheft

## Anlagen, Teil A

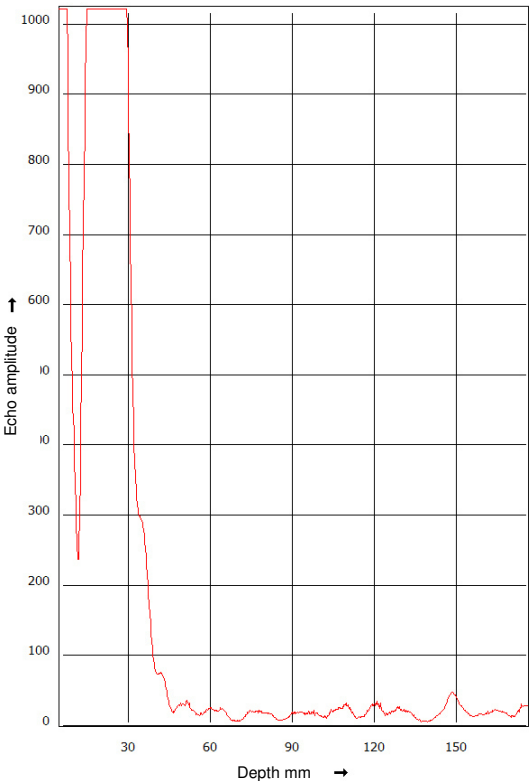
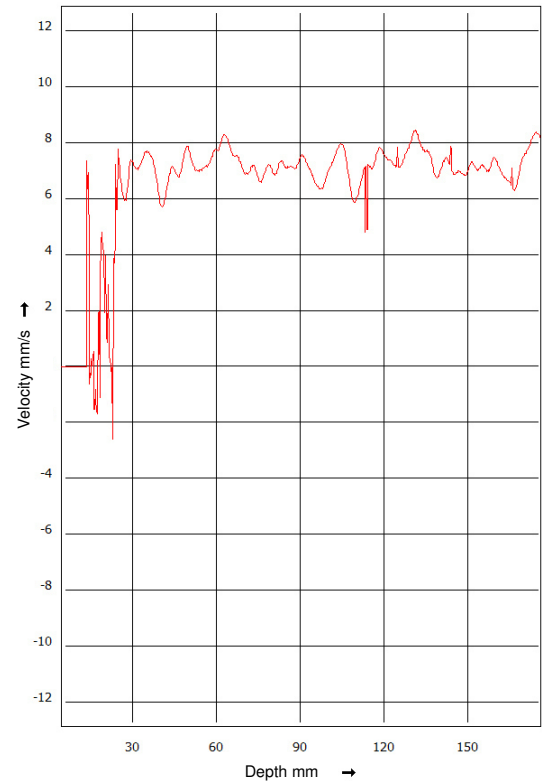
**Messergebnisse (Geschwindigkeits-Profil und Echo-Profil) aller am Behälter möglichen Positionen**

**Deckel 1, P1, 60 U/min**

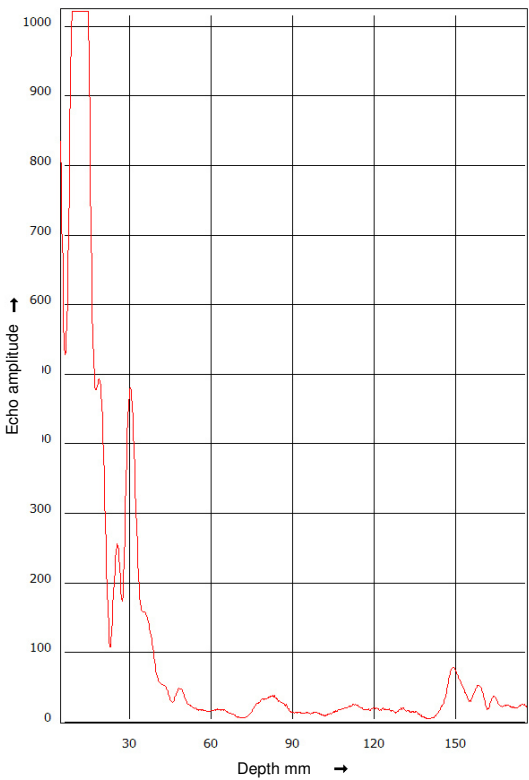
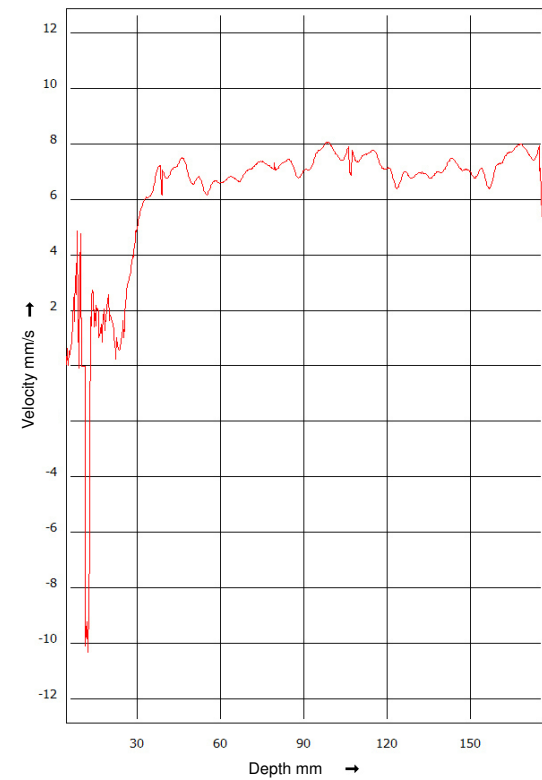


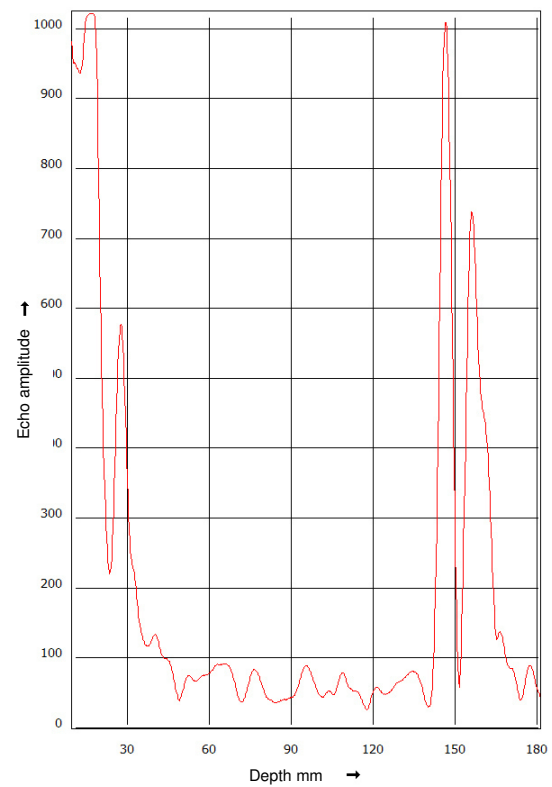
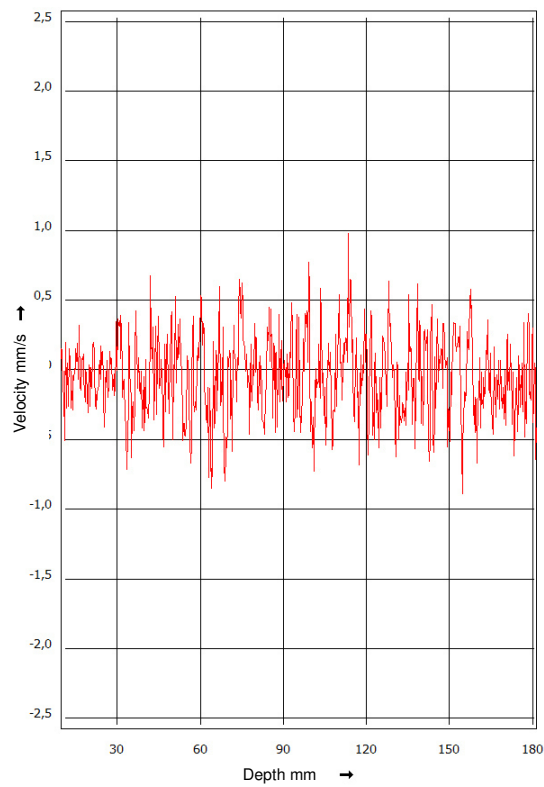
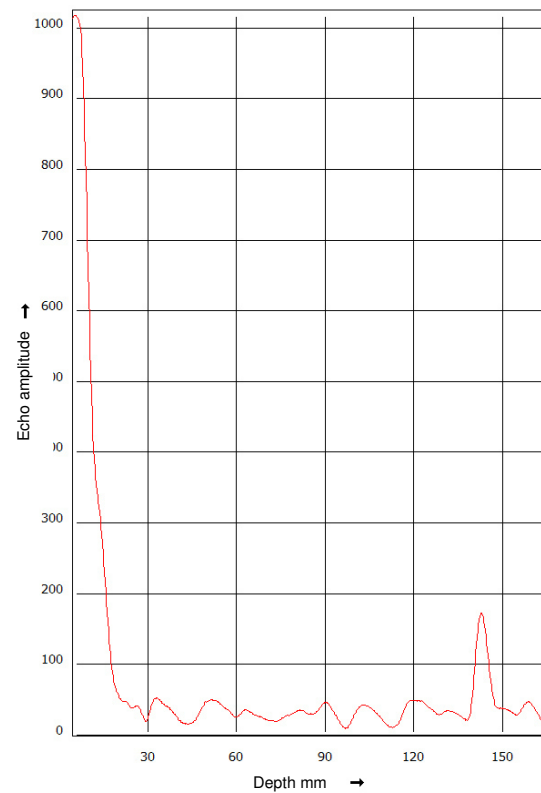
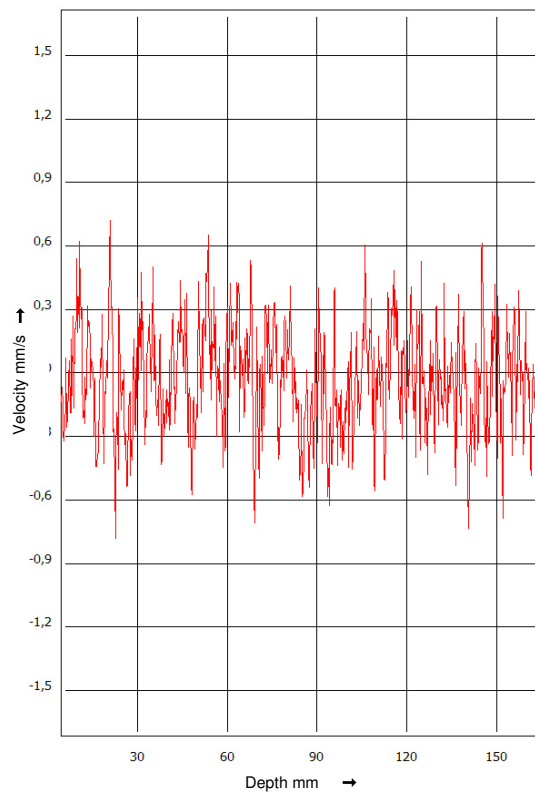


**Deckel 1, P2, 60 U/min**

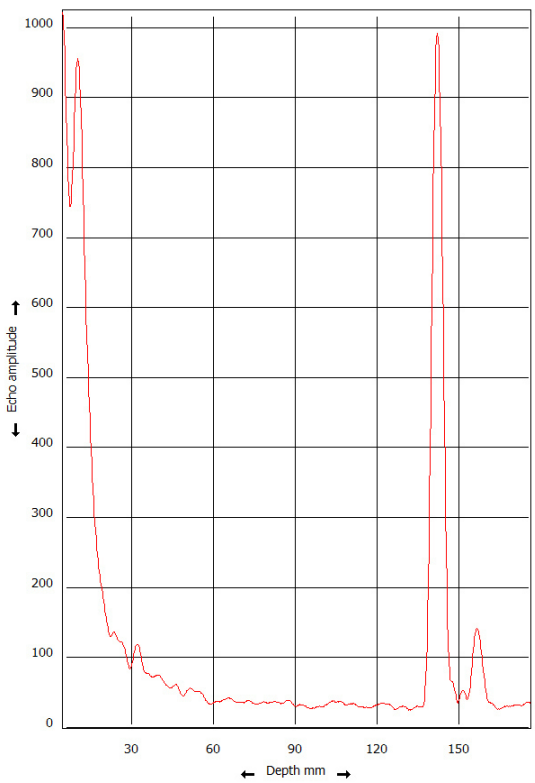
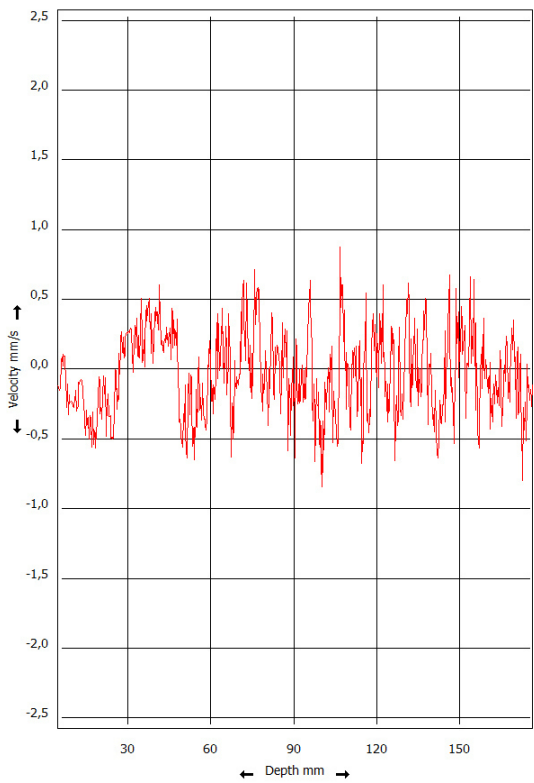


**Deckel 1, P3, 60 U/min**

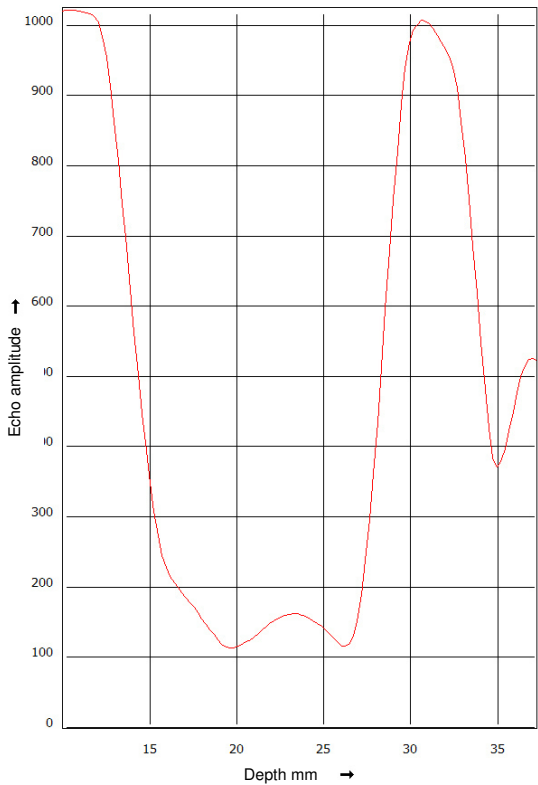
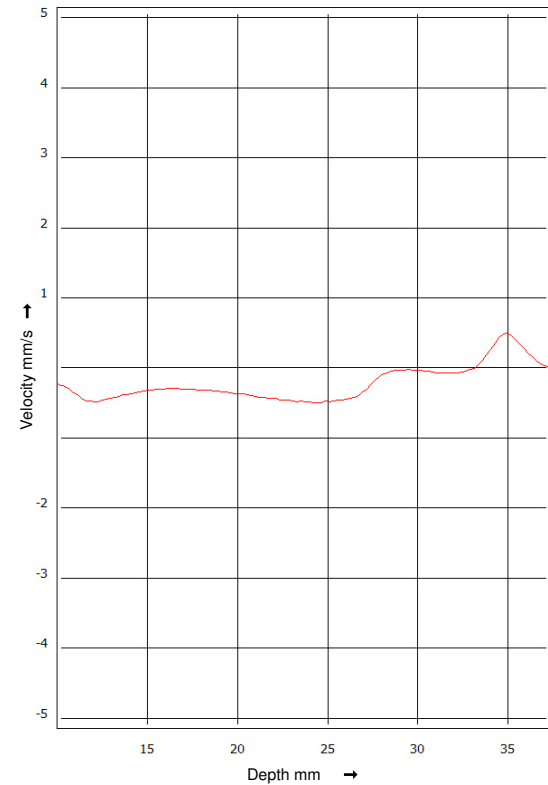


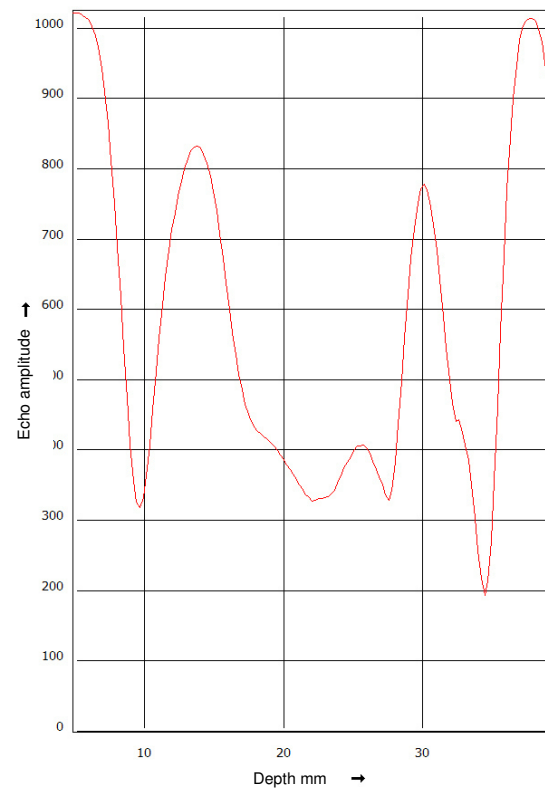
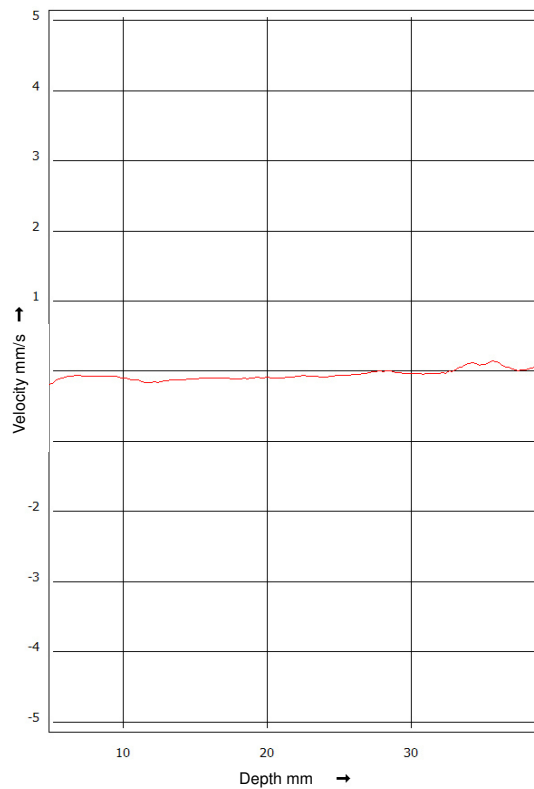
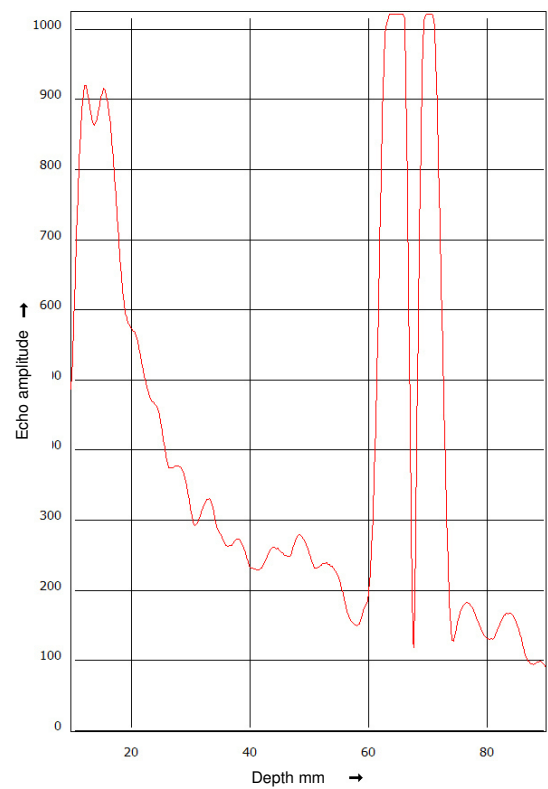
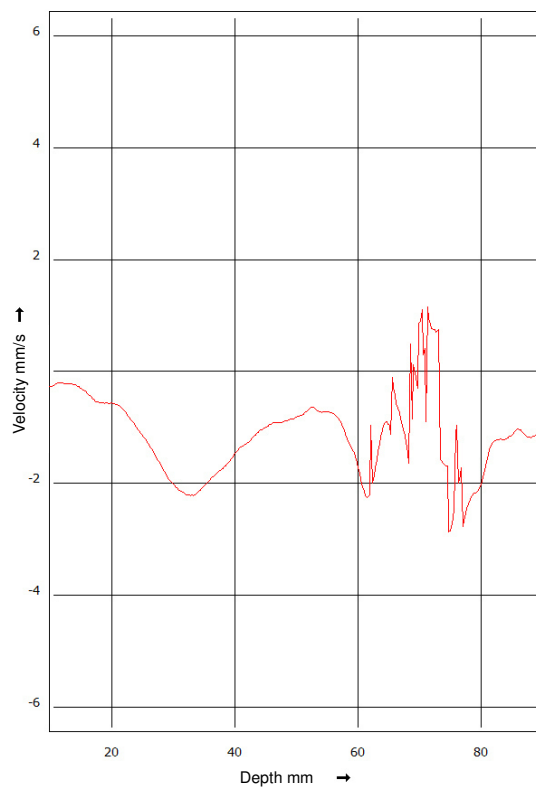
**Deckel 2, P1, 60 U/min****Deckel 2, P2, 60 U/min**

**Deckel 2, P3, 60 U/min**

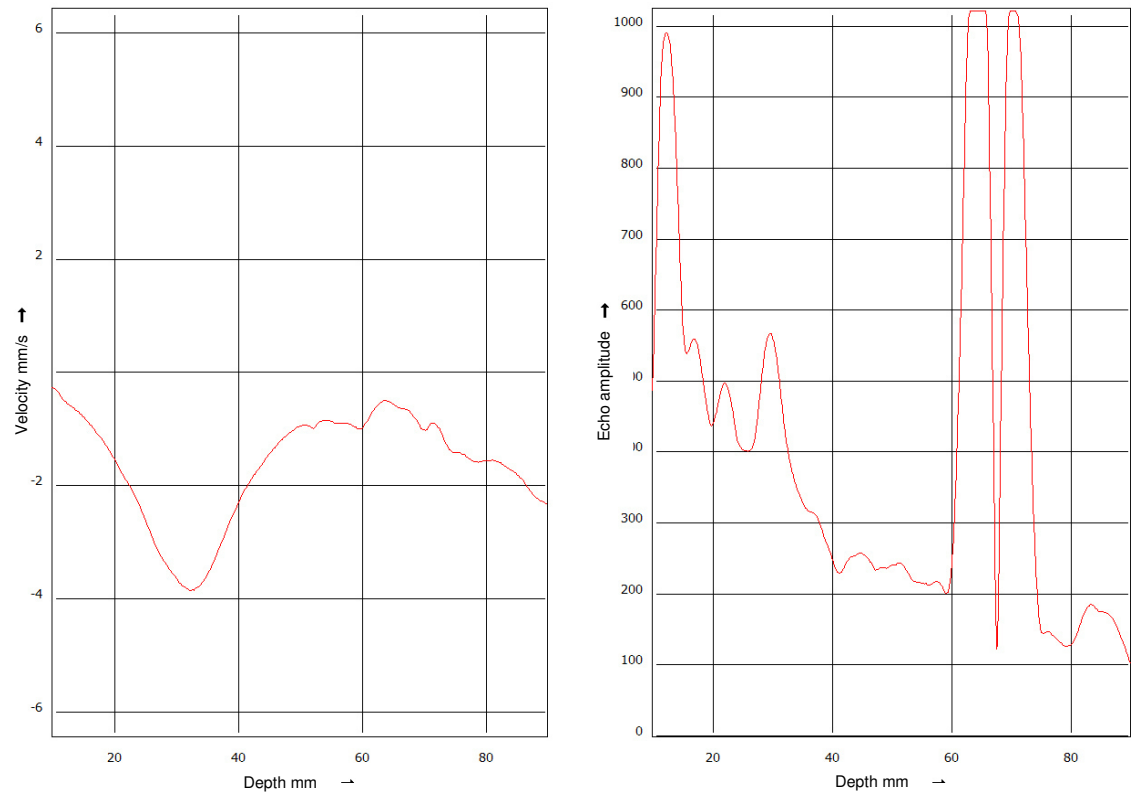


**P4, 60 U/min**

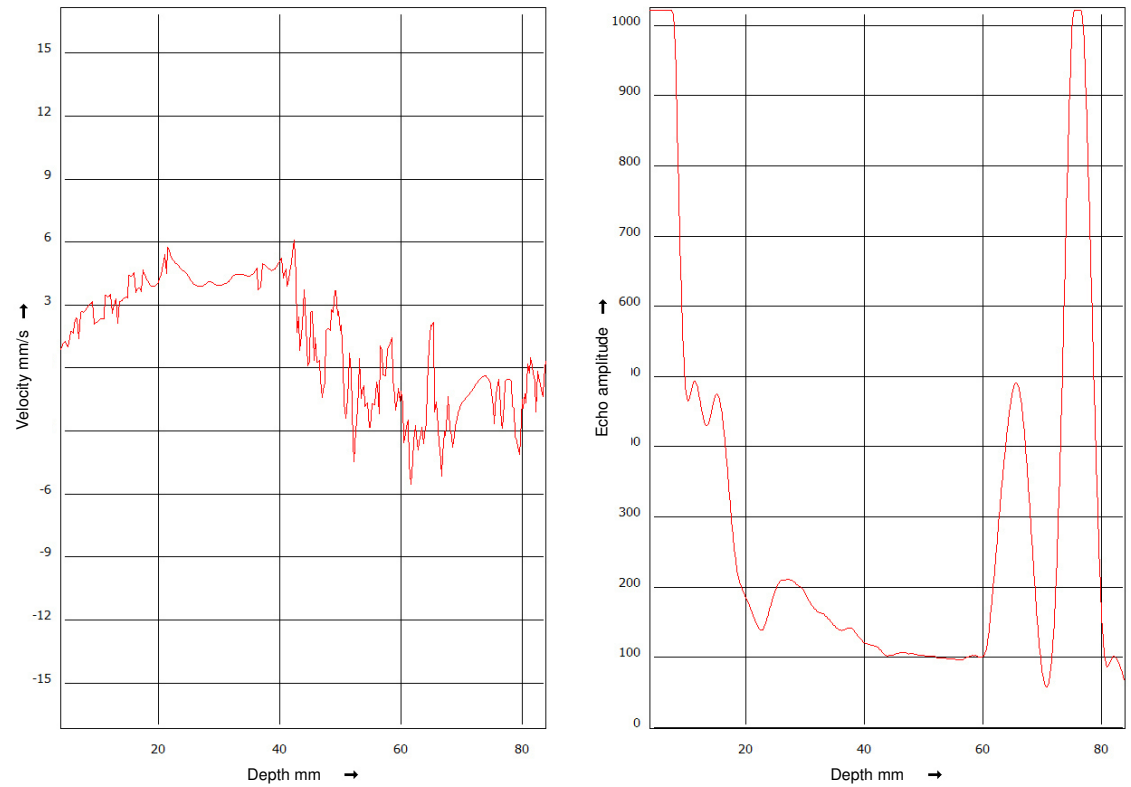


**P5, 60 U/min****P6, 60 U/min**

**P6, 100 U/min**



**P7, 60 U/min**



## Anlagen, Teil B

### ***Matlab Quelltext zur graphischen Darstellung der gemessenen und theoretisch errechneten Werte des Geschwindigkeits-Profils am Beispiel P6 100 U/min***

```
ri=2.5

ra=34

r=10

f=100/60

Oi=2*pi*f

V=((ri^2 * Oi)*r/(ri^2 *ra^2))+(((ri^2 * Oi)/(1-(ri^2 / ra^2)))/r)

y=10

x=0:0.5:65

phi=atan((x-32.5)/y)

Vphi=cos(phi)*V

x2=xlsread('400U.xls',1,'A3:A85')

y2=xlsread('400U.xls',1,'B3:B85')

Vphi2=interp1(x2,y2,x)

plot(x,Vphi,'-r',x,-Vphi2,'-b')

grid on

xlabel('depth [mm]')

ylabel('Vphi [mm/s]')

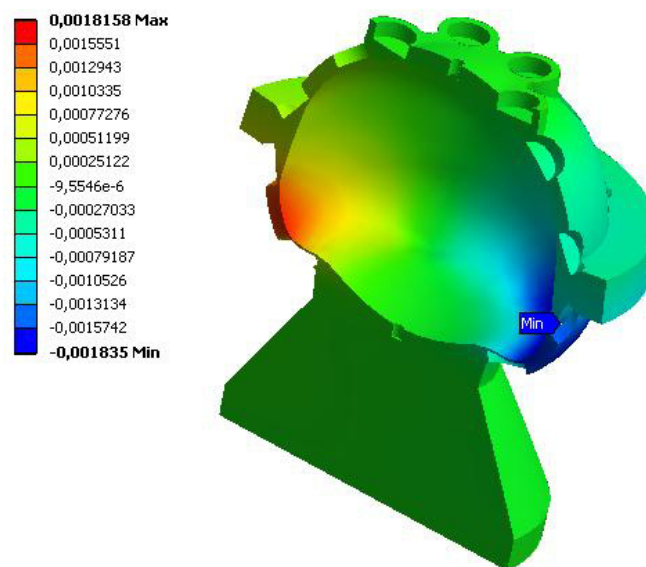
title ('Vphi [mm/s], r=10mm, Omega1=100U/min')

legend('Vphi1','Vphi2')
```

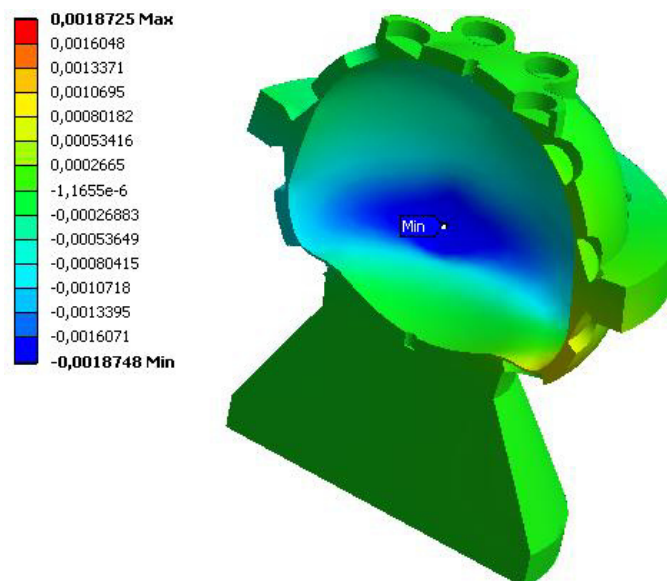
## Anlagen, Teil C

### *Konturplots des ersten Berechnungsentwurf des Behälters*

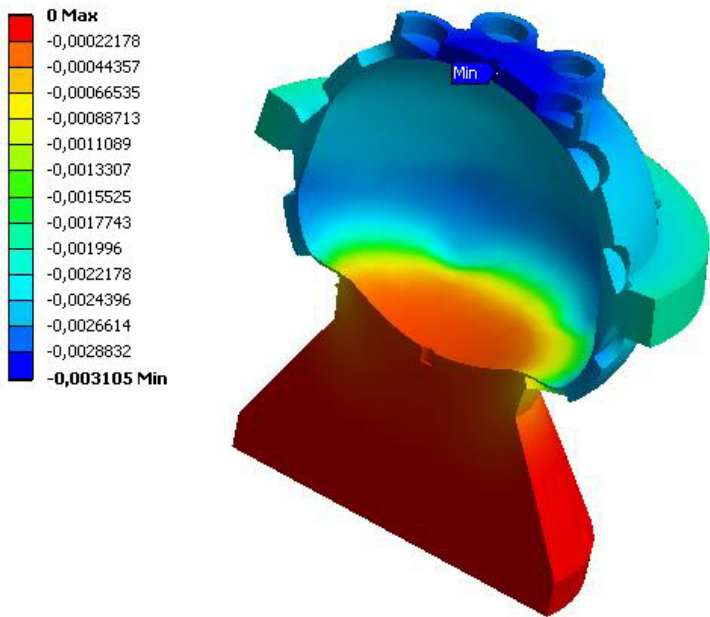
#### *Verschiebungen in X in mm*



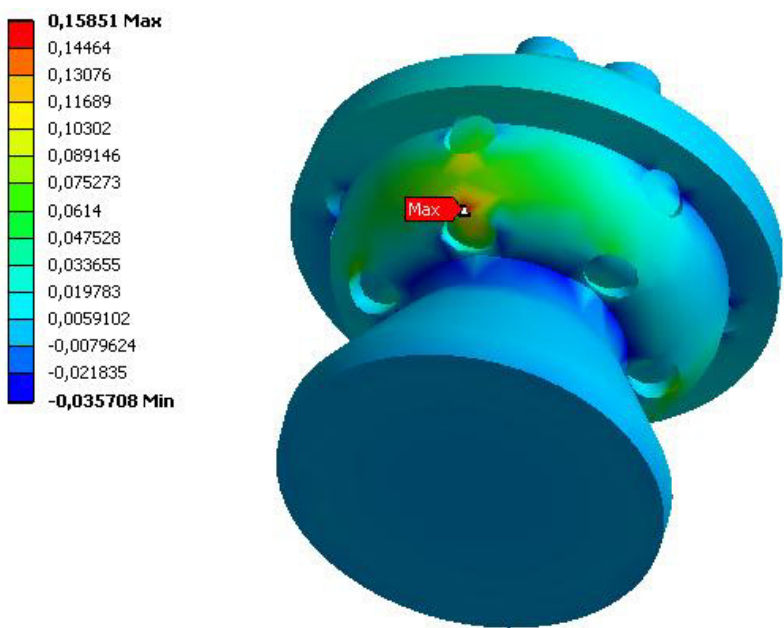
#### *Verschiebungen in Y mm*



Verschiebungen in Z mm

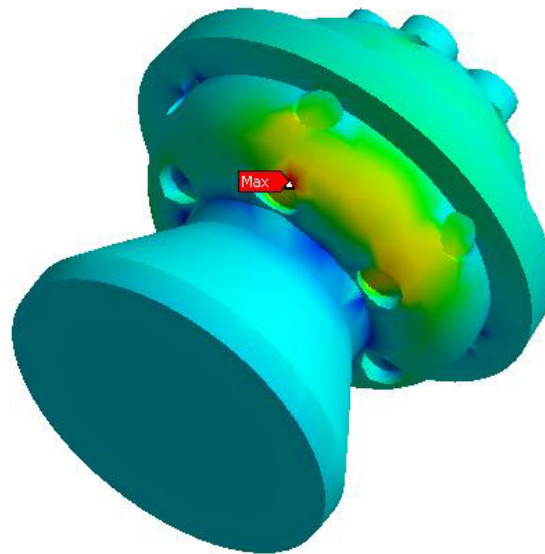
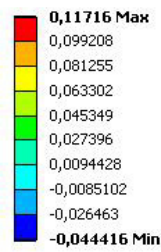


Spannungen in X in  $\frac{N}{mm^2}$

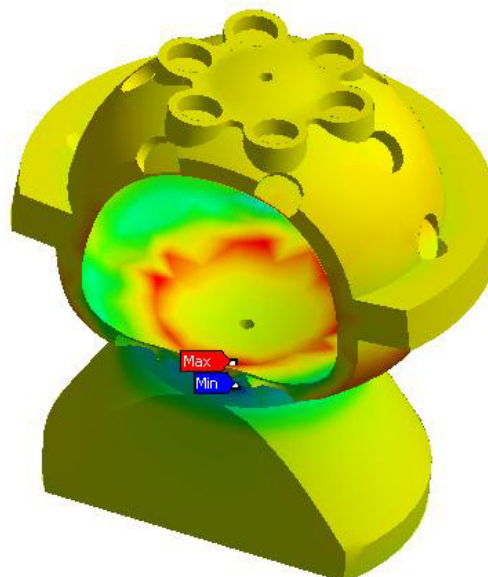
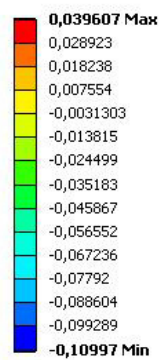




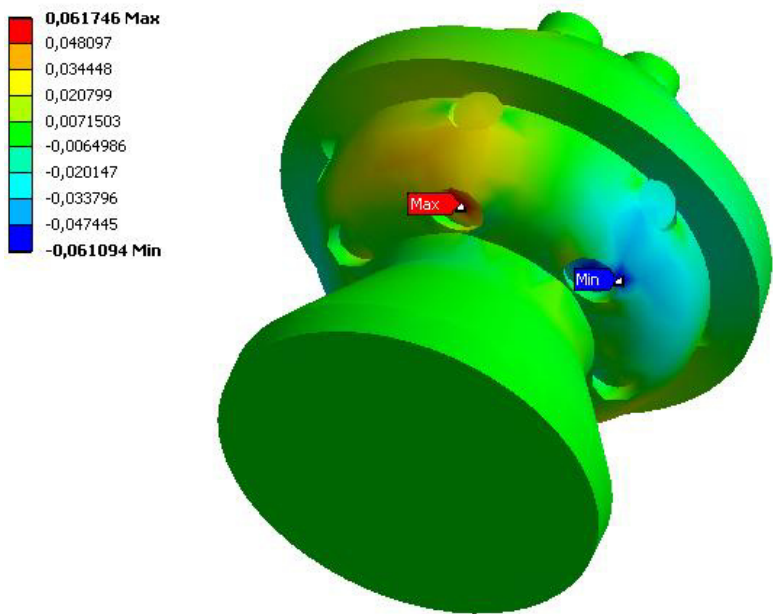
### Spannungen in Y in $\frac{N}{mm^2}$



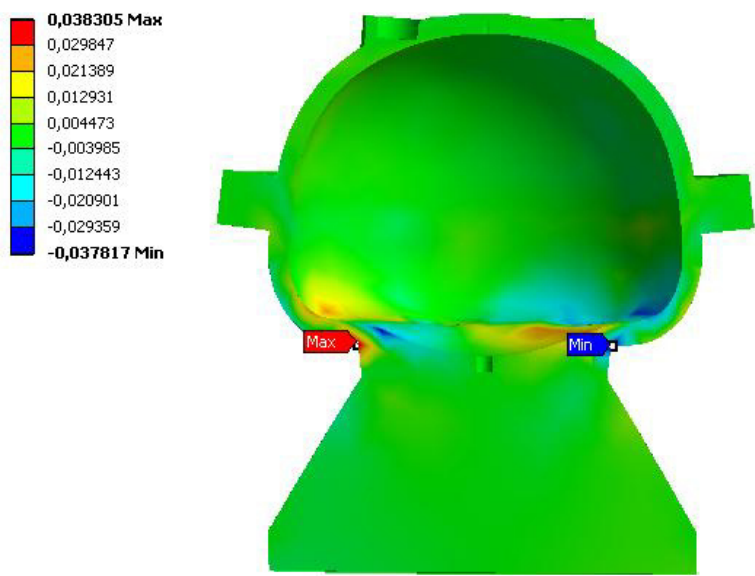
### Spannungen in Z in $\frac{N}{mm^2}$



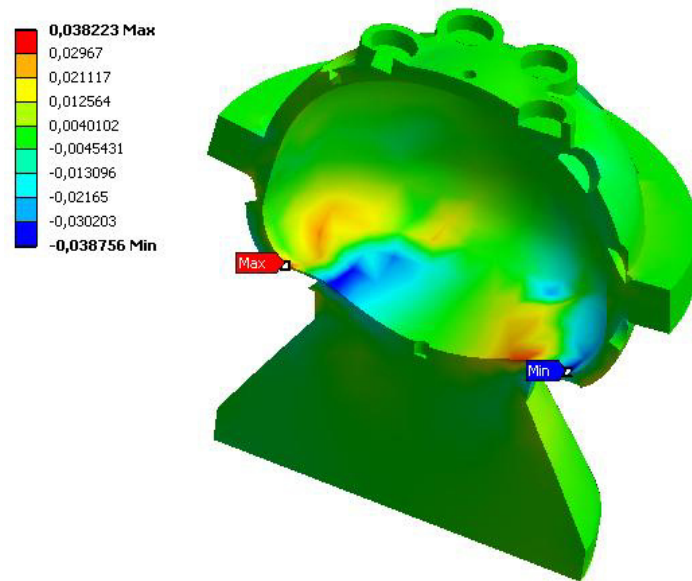
*Schubspannungen in XY-Ebene in  $\frac{N}{mm^2}$*



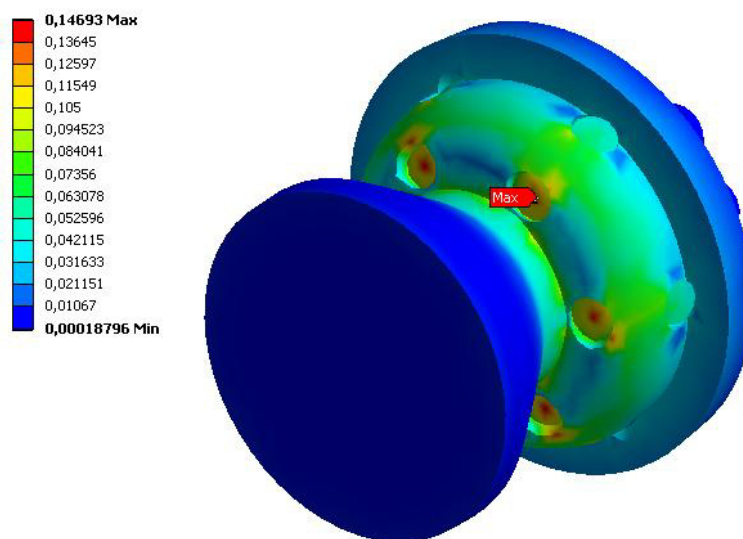
*Schubspannungen in XZ-Ebene in  $\frac{N}{mm^2}$*



### *Schubspannungen in YZ-Ebene in $\frac{N}{mm^2}$*



### *Von Mises Vergleichsspannungen in $\frac{N}{mm^2}$*



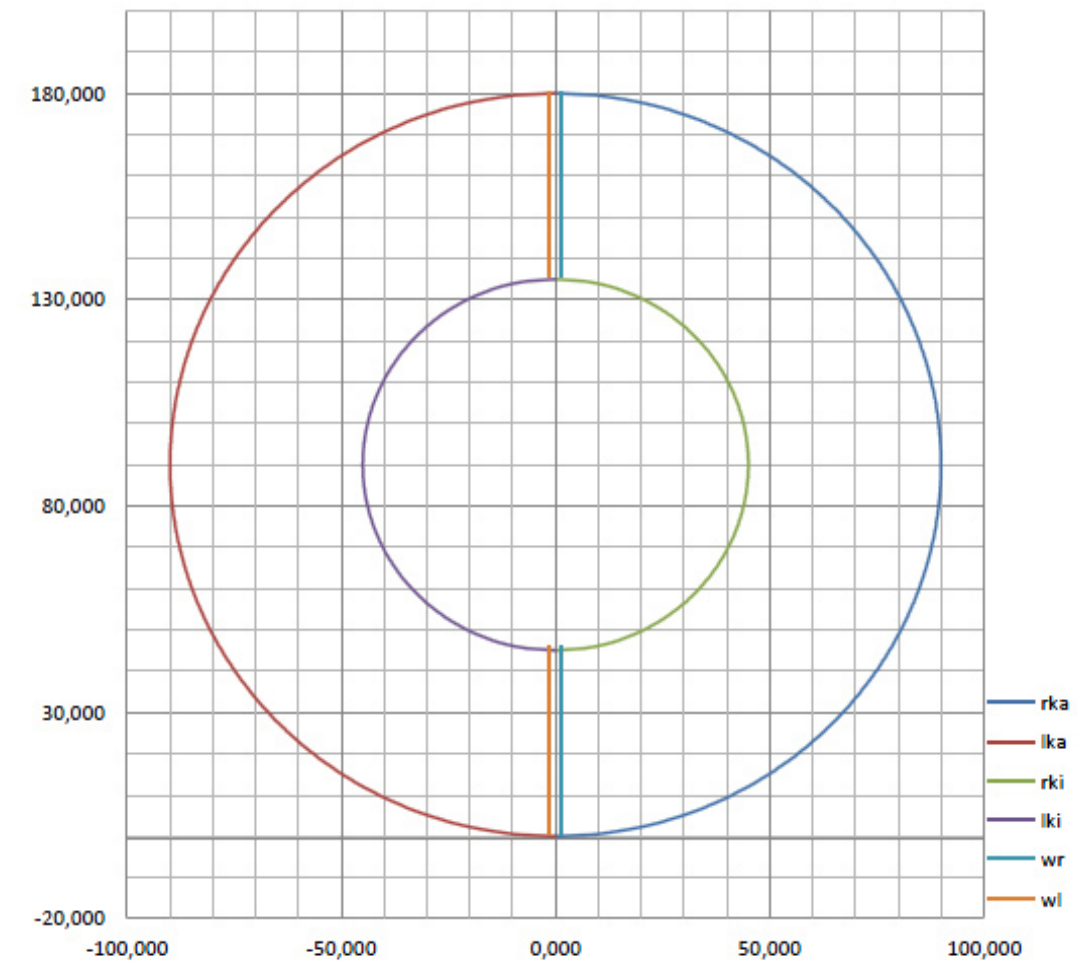
## Anlagen, Teil D

Eingabe	
Radius äußere Kugel:	90 mm
Radius innere Kugel:	45 mm
Mittelpunkt x:	0 mm
Mittelpunkt y:	90 mm
Durchmesser Loch:	7 mm
Durchmesser Welle:	3 mm
max. Geschwindigkeit Ar:	20 m/s

Ausgabe	
Querschnitt Loch:	3,84845E-05 m <sup>2</sup>
Querschnitt Welle:	7,06858E-06 m <sup>2</sup>
reeller Querschnitt Abfluss:	3,84845E-05 m <sup>2</sup>
Ausflusszeit GalnSn:	59,91 s
max. Volumenstrom:	7,23222E-05 m <sup>3</sup> /s
Querschnitt Rohr Ar:	3,62 mm <sup>2</sup>
<b>min. Durchmesser Rohr Ar:</b>	<b>2,15 mm</b>

*Argon muss gleichen Volumenstrom erzielen,  
bei geringerem Durchmesser aber größerer  
möglicher Strömungsgeschwindigkeit.  
Zu Beginn herrscht größter Volumenstrom,  
da Ausflussgeschwindigkeit hier am größten ist.  
Dieser Volumenstrom muss maximal erreicht werden.*

rka... rechte Kugelhälfte außen  
lka... linke Kugelhälfte außen  
rki... rechte Kugelhälfte innen  
lki... linke Kugelhälfte innen  
wr... Welle recht  
wl... Welle links  
A\_äK... Querschnitt äußere Kugel  
A\_W... Querschnitt Welle  
A\_iK... Querschnitt innere Kugel  
A\_ist... reeller Querschnitt  
Δci... Strömungsgeschwindigkeit der Scheibe  
ΔV... Volumen der Scheibe  
ΔV\*... Volumenstrom der Scheibe  
Δt... Ausflusszeit der Scheibe



rka	lka	rki	lki	wr	wl	Höhe [mm]	A_äK [mm <sup>2</sup> ]	A_W [mm <sup>2</sup> ]	A_iK [mm <sup>2</sup> ]	A_ist [mm <sup>2</sup> ]	Δci [m/s]	ΔV [mm <sup>3</sup> ]	ΔV* [m <sup>3</sup> /s]	Δt [s]	t [s]
0,000	0,000			1,500	-1,500	180,000	0,000	7,069	0,000	0,000	1,879	0,000	7,23222E-05	0,000	0,000
9,474	-9,474			1,500	-1,500	179,500	281,958	7,069	0,000	274,889	1,877	137,445	7,22217E-05	0,002	0,002
13,379	-13,379			1,500	-1,500	179,000	562,345	7,069	1,000	555,277	1,874	277,638	7,2121E-05	0,004	0,006
16,363	-16,363			1,500	-1,500	178,500	841,161	7,069	2,000	834,093	1,871	417,046	7,20202E-05	0,006	0,012
18,868	-18,868			1,500	-1,500	178,000	1118,407	7,069	3,000	1111,338	1,869	555,669	7,19193E-05	0,008	0,019
21,065	-21,065			1,500	-1,500	177,500	1394,082	7,069	4,000	1387,013	1,866	693,507	7,18182E-05	0,010	0,029
23,043	-23,043			1,500	-1,500	177,000	1668,186	7,069	5,000	1661,117	1,864	830,559	7,1717E-05	0,012	0,041
24,855	-24,855			1,500	-1,500	176,500	1940,719	7,069	6,000	1933,650	1,861	966,825	7,16156E-05	0,014	0,054
26,533	-26,533			1,500	-1,500	176,000	2211,681	7,069	7,000	2204,613	1,858	1102,306	7,15141E-05	0,015	0,069
28,102	-28,102			1,500	-1,500	175,500	2481,073	7,069	8,000	2474,004	1,856	1237,002	7,14125E-05	0,017	0,087
29,580	-29,580			1,500	-1,500	175,000	2748,894	7,069	9,000	2741,825	1,853	1370,912	7,13107E-05	0,019	0,106

**Auszug Ausflusszeit am Beispiel innere Kugel d=90 mm**

## Anlagen, Teil E

### ***Berechnung der Auftriebs- und Gewichtskräfte für die beiden inneren Sphäre***

#### **1. Auftriebskräfte**

**geg.**

**ges.**

$$Vol_{1\_klein} = 113097 \text{ mm}^3$$

$$F_{A\_klein}$$

$$Vol_{1\_gro\beta} = 381704 \text{ mm}^3$$

$$F_{A\_gro\beta}$$

$$\rho_{Fluid} = 6360 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g = 9,8066 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Allgemein berechnet sich die Auftriebskraft nach:

$$F_A = g \rho_{Fluid} Vol_{1\_klein/gro\beta}$$

Auftriebskraft der kleinen inneren Sphäre:

$$F_{A\_klein} = 9,8066 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 6360 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,000113097 \text{ m}^3 = 7,054 \text{ N}$$

Auftriebskraft der großen inneren Sphäre:

$$F_{A\_gro\beta} = 9,8066 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 6360 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,000381704 \text{ m}^3 = 23,807 \text{ N}$$

**2. Gewichtskräfte****geg.**

$$r_{Inlay\_klein} = 0,0275 \text{ m}$$

$$r_{Inlay\_groß} = 0,04 \text{ m}$$

$$\rho_{Blei} = 11350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g = 9,8066 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Schüttdichte} = 7300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

**ges.**

$$F_{G\_klein}$$

$$F_{G\_groß}$$

$$F_{G\_groß\_Bleischrot}$$

Allgemein berechnet sich die Gewichtskraft nach:

$$F_G = g \rho_{Blei} Vol_{Inlay\_klein/groß}$$

Allgemein berechnet sich das Volumen der Inlays nach:

$$Vol_{Inlay\_klein/groß} = \pi \times \frac{4}{3} \times R_{Inlay}^3$$

Volumen Inlay kleine Sphäre:

$$Vol_{Inlay\_klein} = \pi \times \frac{4}{3} \times R_{Inlay\_klein}^3 = 8,71 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Volumen Inlay große Sphäre:

$$Vol_{Inlay\_gro\beta} = \pi \times \frac{4}{3} \times R_{Inlay\_gro\beta}^3 = 2,68 \times 10^{-4} m^3$$

Gewichtskraft der kleinen inneren Sphäre mit Bleikern:

$$F_{G\_klein} = 9,8066 \frac{m}{s^2} \times 11350 \frac{kg}{m^3} \times 8,71 \times 10^{-5} m^3 = 9,695 N$$

Gewichtskraft der großen inneren Sphäre mit Bleikern:

$$F_{G\_gro\beta} = 9,8066 \frac{m}{s^2} \times 11350 \frac{kg}{m^3} \times 2,68 \times 10^{-4} m^3 = 29,830 N$$

Gewichtskraft der großen inneren Sphäre mit Bleischrot:

$$F_{G\_gro\beta\_Bleischrot} = g \times Sch\ddot{u}ttdichte \times Vol_{Inlay\_gro\beta}$$

$$F_{G\_gro\beta\_Bleischrot} = 9,8066 \frac{m}{s^2} \times 7300 \frac{kg}{m^3} \times 2,68 \times 10^{-4} m^3 = 19,186 N$$

Gewichtskraft nicht ausreichend mit Bleischrot Durchmesser 2,5 mm

## Anlagen, Teil F

### Vereinfachter statischer Festigkeitsnachweis der Welle

**geg.**

**ges.**

$$m_{1\_gro\beta} = 3,295 \text{ kg}$$

$$S_F$$

$$R_{1\_gro\beta} = 0,045 \text{ m}$$

$$d_{Welle} = 3 \text{ mm}$$

$$R_e = 190 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$g = 9,8066 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$S_{F \min} = 1,5$$

$$\omega_{\max} = 2\pi f = 2\pi \times 0,5 = \pi$$

Statische Sicherheit gegen Fließen:

$$S_F = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{zd \max}}{R_p}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{t \max}}{\tau_{tF}}\right)^2}} \geq S_{F \min}$$

Maximale Zugbelastung:

$$\sigma_{zd \max} = \frac{m_{1\_gro\beta} \times g}{A_{Welle}}$$



mit  $A_{Welle}$  gleich:

$$A_{Welle} = \frac{\pi}{4} \times d_{Welle}^2 = 7,069 \text{ mm}^2$$

Ergibt sich für  $\sigma_{zd \max}$ :

$$\sigma_{zd \max} = \frac{3,295 \text{ kg} \times 9,8066 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{7,069 \text{ mm}^2} = 4,57 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Maximale Torsionsspannung:

$$\tau_{t \max} = \frac{Tm_{\max}}{W_t}$$

Widerstandsmoment gegen Torsion:

$$W_t = \frac{\pi d_{welle}^3}{16} = \frac{\pi 3^3 \text{ mm}^3}{16} = 5,301 \text{ mm}^3$$

Maximal auftretendes Torsionsmoment durch Trägheit der inneren Sphäre bei einem plötzlichen Stillstand der Welle (ein Wellenende eingespannt):

$$Tm_{\max} = \frac{1}{2} J_{1\_gro\beta} \Omega_{\max}^2$$

Trägheitsmoment der inneren Sphäre:

$$\begin{aligned} J_1 &= \frac{2}{5} m_{1\_gro\beta} R_{1\_gro\beta}^2 \\ &= \frac{2}{5} \times 3,295 \text{ kg} \times 0,045^2 \text{ m}^2 = 0,00266895 \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

Somit ergibt sich für das maximale Torsionsmoment:

$$\begin{aligned} Tm_{max} &= \frac{1}{2} J_{1_{\text{groß}}} \Omega_{max}^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 0,00266895 \text{ kgm}^2 \times \pi^2 \text{ s}^{-2} = 0,01317 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Maximal auftretende Torsionsspannung:

$$\tau_{t \max} = \frac{13,17 \text{ Nmm}}{5,301 \text{ mm}^3} = 2,50 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Zulässige Torsionsspannung:

$$\tau_{tF} = \frac{1,2 R_p}{\sqrt{3}} = \frac{1,2 \times 190}{\sqrt{3}} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 131,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Damit ergibt sich für die Sicherheit gegen Fließen:

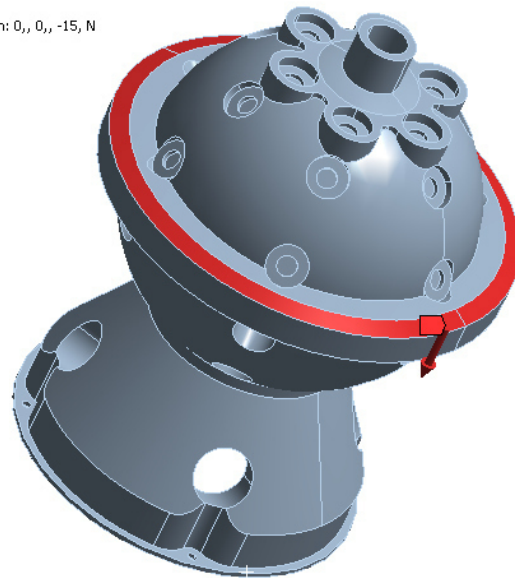
$$S_F = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{4,57}{190}\right)^2 + \left(\frac{2,5}{131,6}\right)^2}} = 32 \geq 1,5$$

## Anlagen, Teil G

### *Konturplots der Berechnung nach aktualisierter Geometrie*

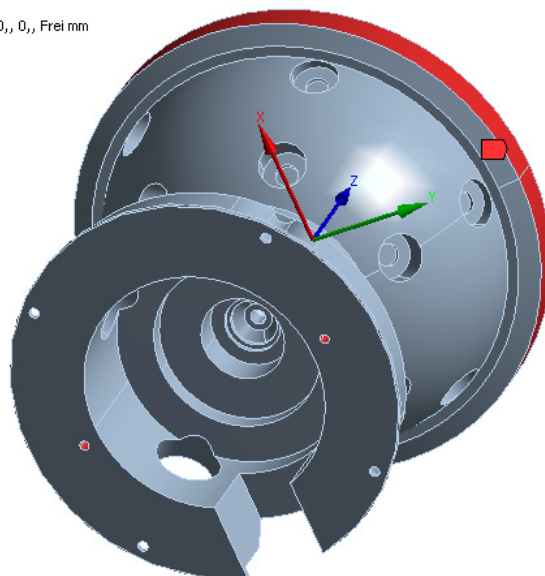
#### ***Gewichtskraft durch Spannkette in N***

■ Kraft: 15, N  
Komponenten: 0,, 0,, -15, N

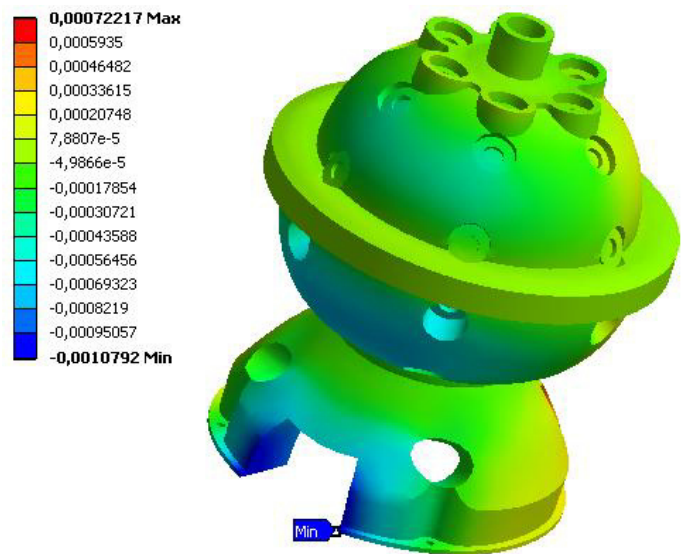


#### ***Einspannung an Bohrungen für Stifte und durch Spannkette***

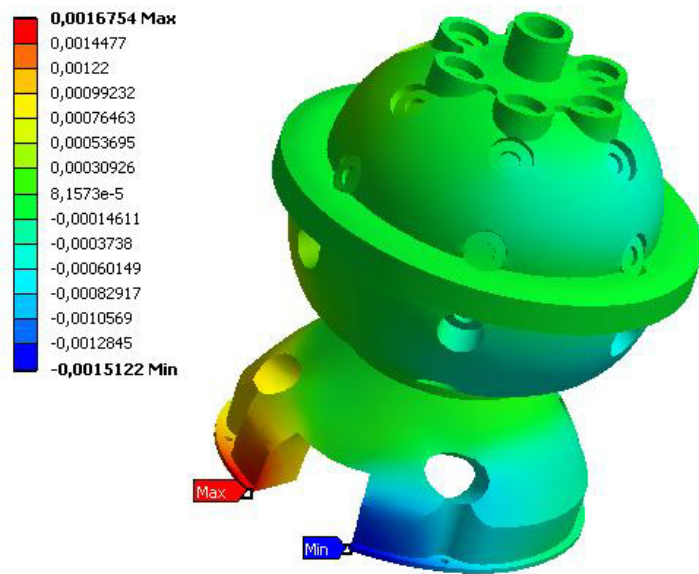
■ Verschiebung Z  
Komponenten: 0,, 0,, Frei mm

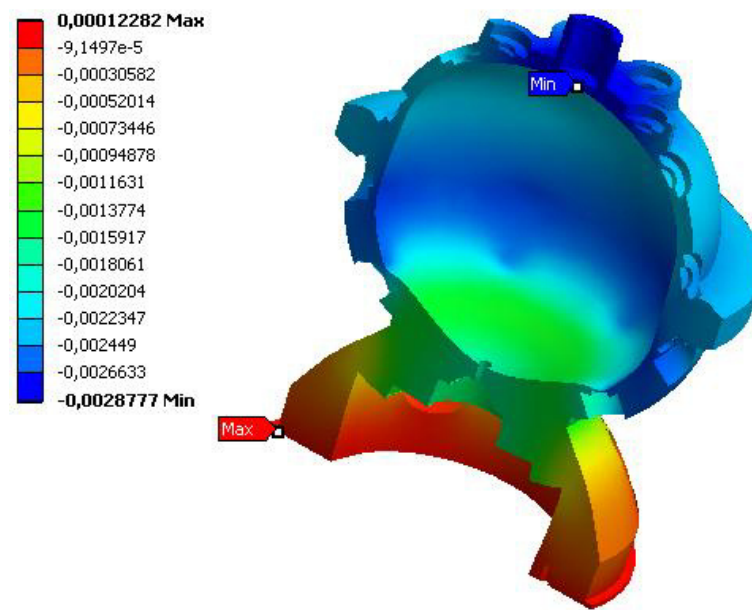
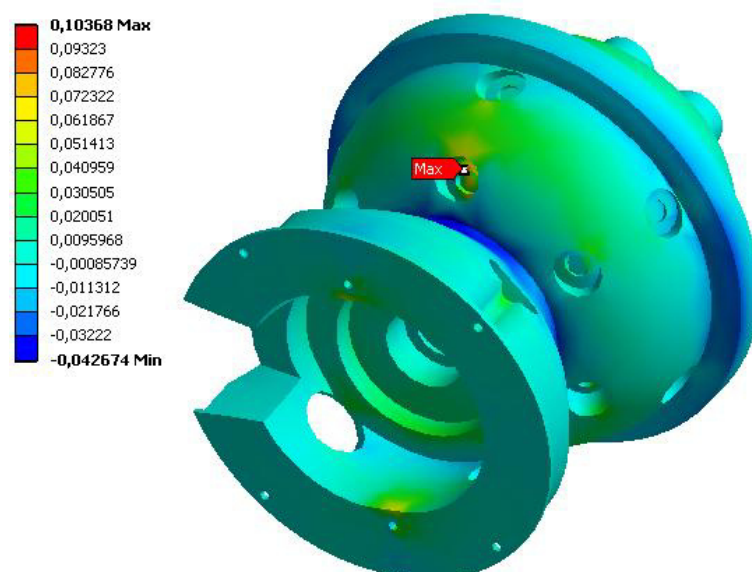


***Verschiebungen in X in mm***

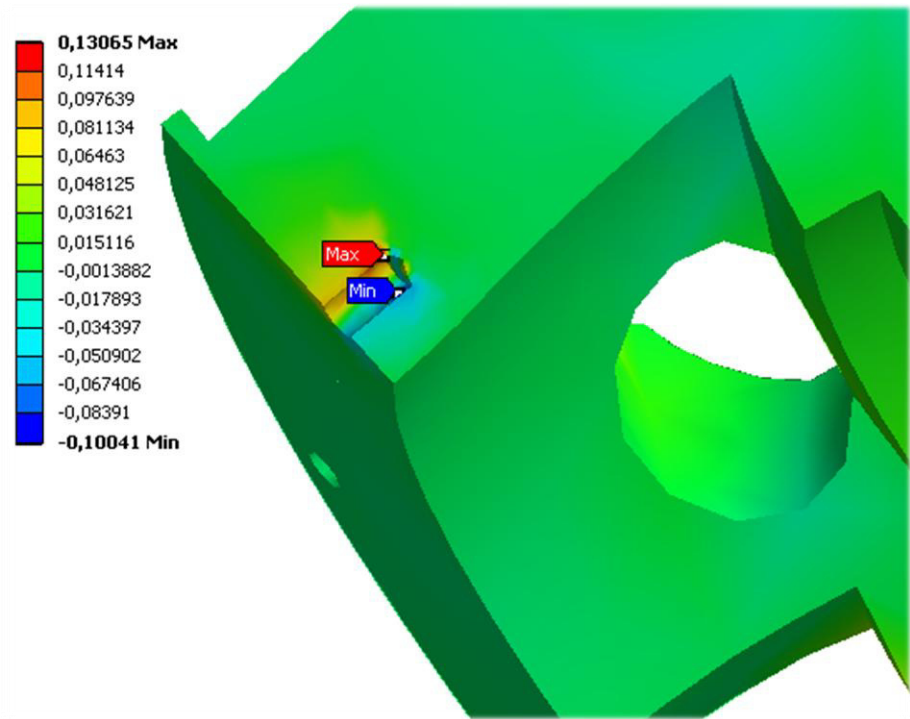


***Verschiebungen in Y in mm***

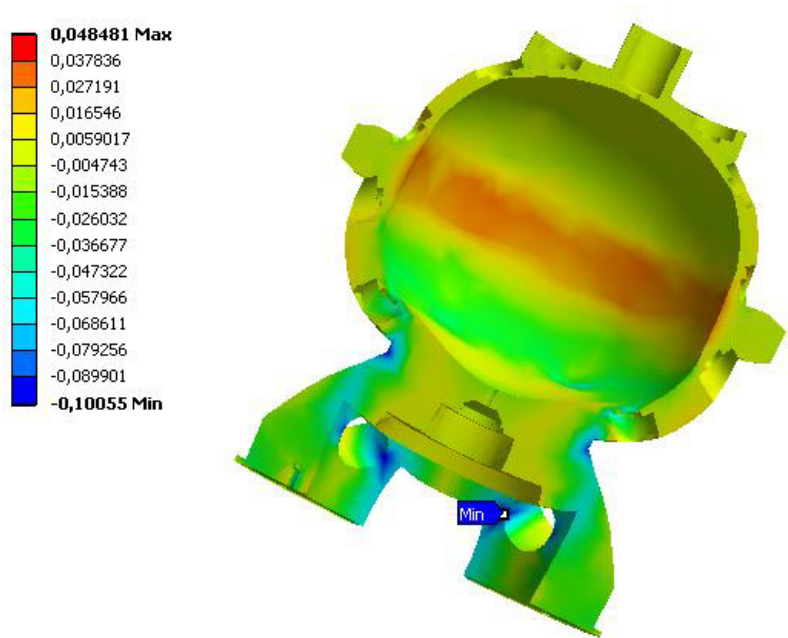


**Verschiebungen in Z in mm****Spannungen in X in  $\frac{N}{mm^2}$** 

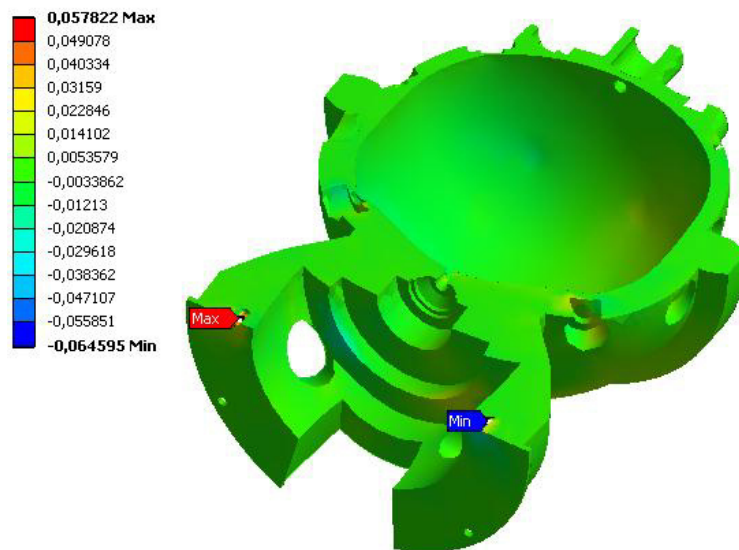
*Spannungen in Y in  $\frac{N}{mm^2}$*



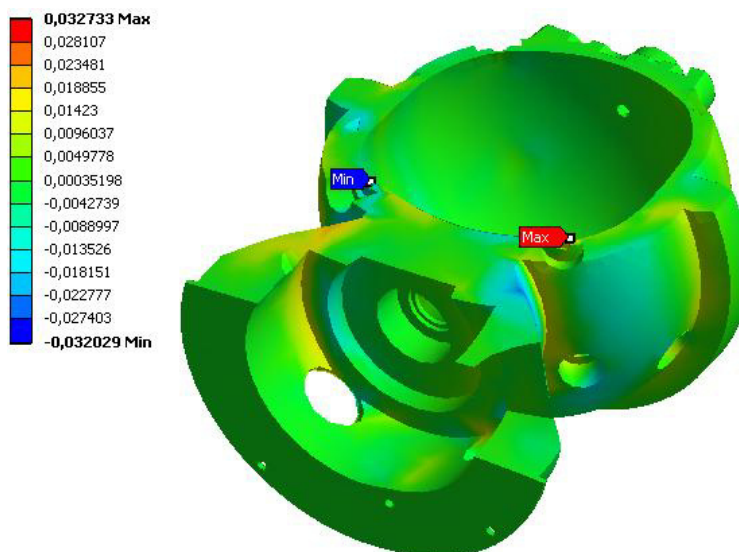
*Spannungen in Z in  $\frac{N}{mm^2}$*



### *Schubspannungen in XY-Ebene in $\frac{N}{mm^2}$*

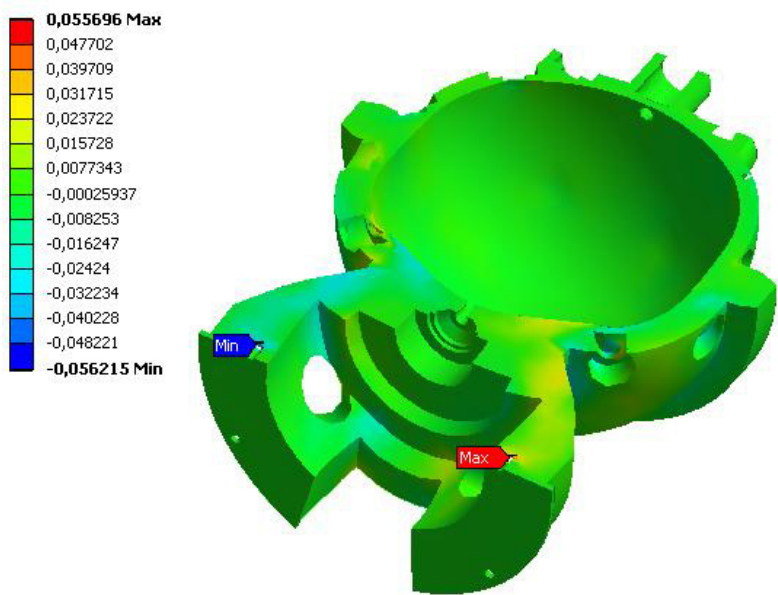


### *Schubspannungen in XZ-Ebene in $\frac{N}{mm^2}$*

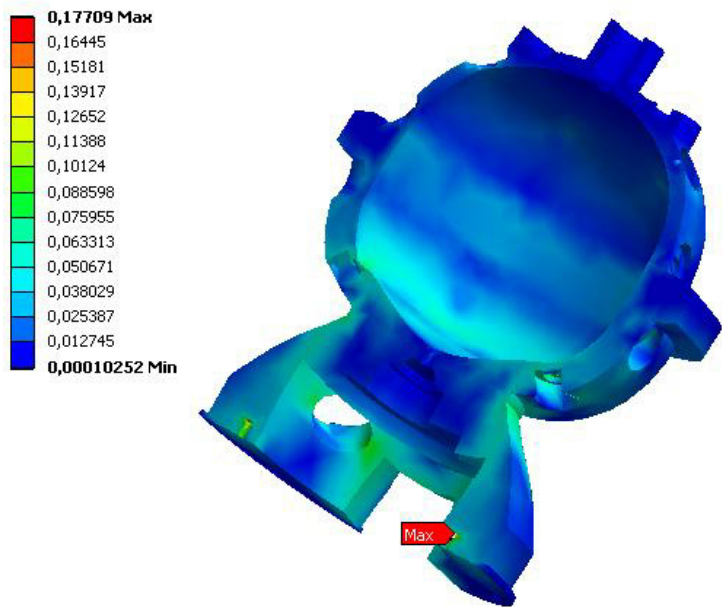




*Schubspannungen in YZ-Ebene in  $\frac{N}{mm^2}$*



*Von Mises Vergleichsspannungen in  $\frac{N}{mm^2}$*





## Anlagen, Teil H

### Konturplots der Berechnung - Gewichtskraft der Inneren Sphäre

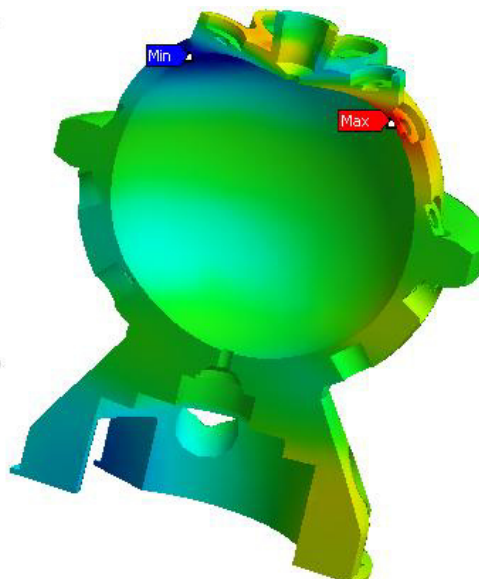
#### wirkende Gewichtskräfte in N

**A** Kraft: 33, N  
**B** Kraft 2: 15, N

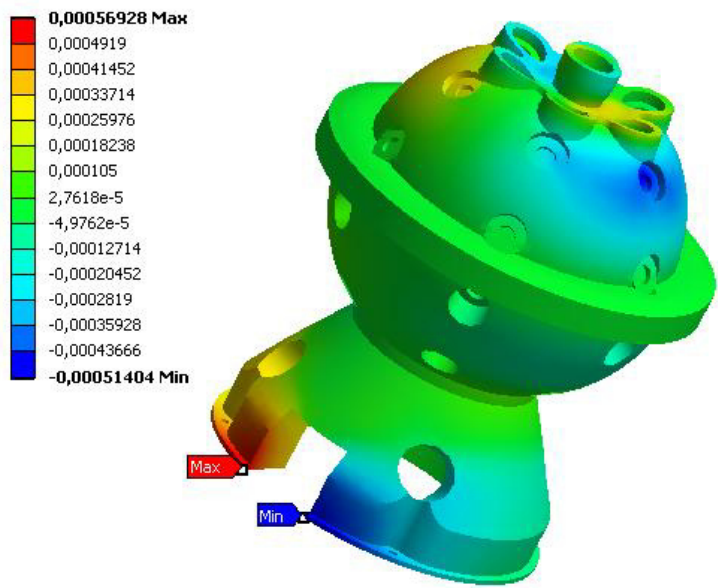


#### Verschiebungen in X in mm

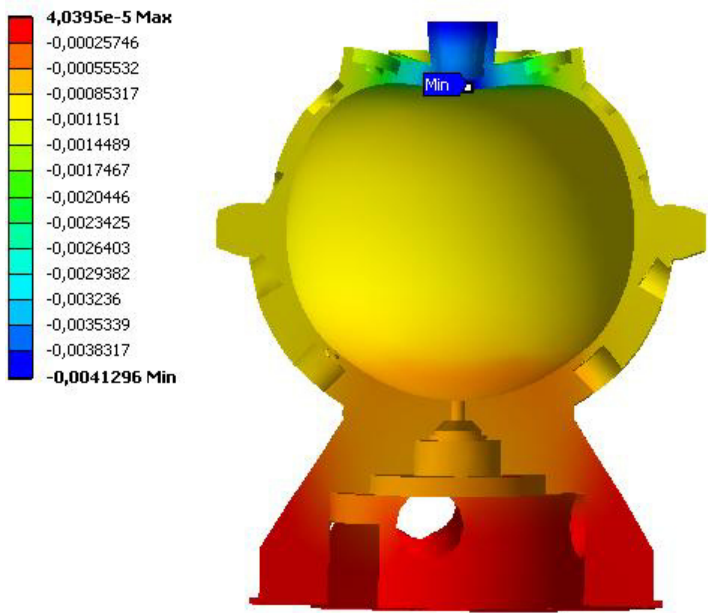
0,00043484 Max  
0,00037139  
0,00030794  
0,00024449  
0,00018104  
0,00011759  
5,4141e-5  
-9,309e-6  
-7,2759e-5  
-0,00013621  
-0,00019966  
-0,00026311  
-0,00032656  
-0,00039001  
-0,00045346 Min



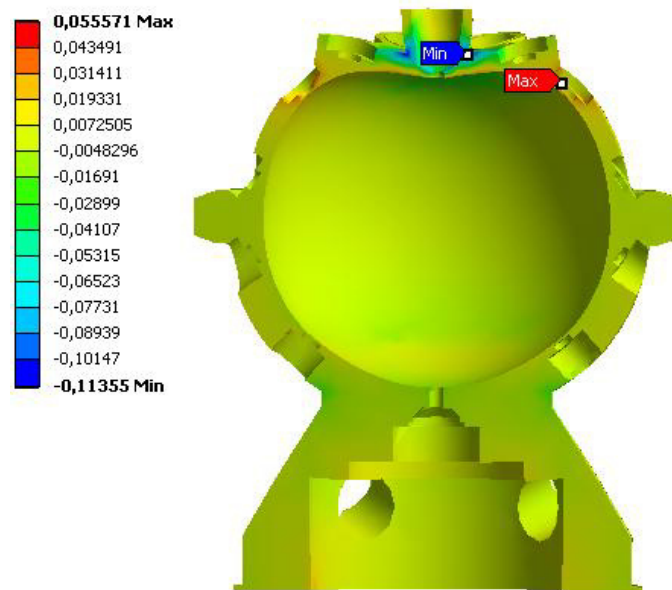
***Verschiebungen in Y in mm***



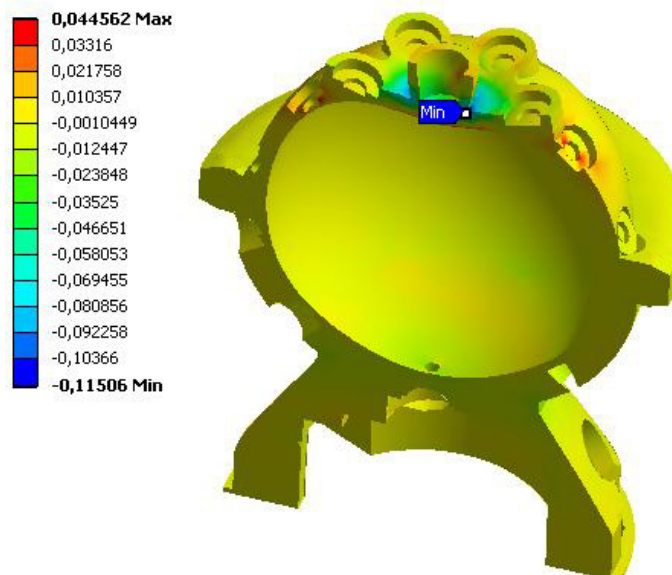
***Verschiebungen in Z in mm***



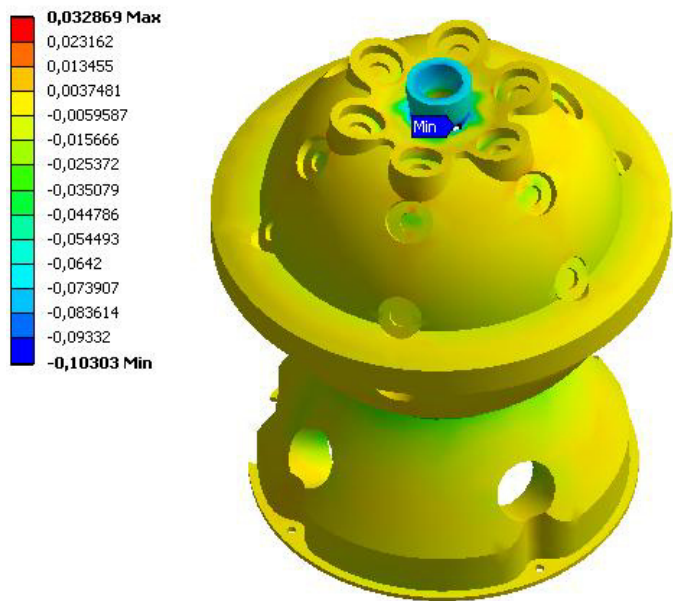
### Spannungen in X in $\frac{N}{mm^2}$



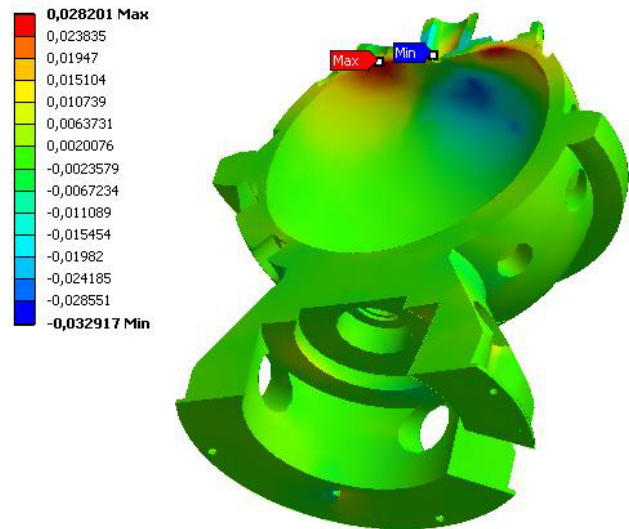
### Spannungen in Y in $\frac{N}{mm^2}$



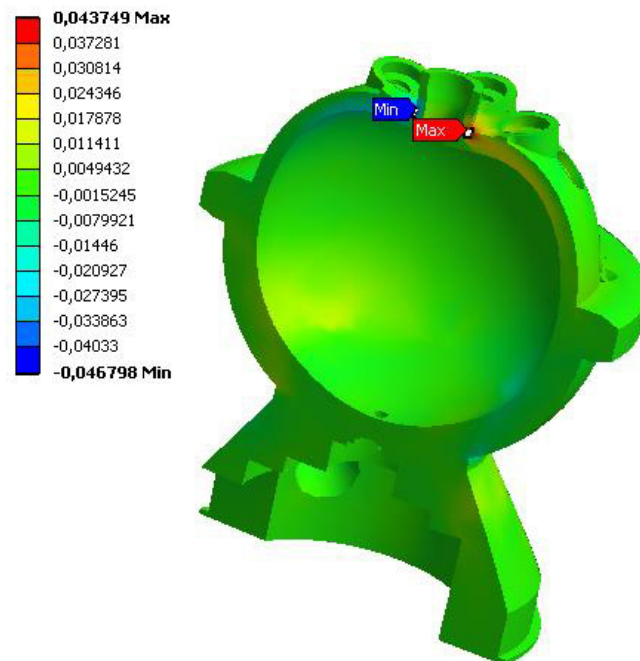
*Spannungen in Z in  $\frac{N}{mm^2}$*



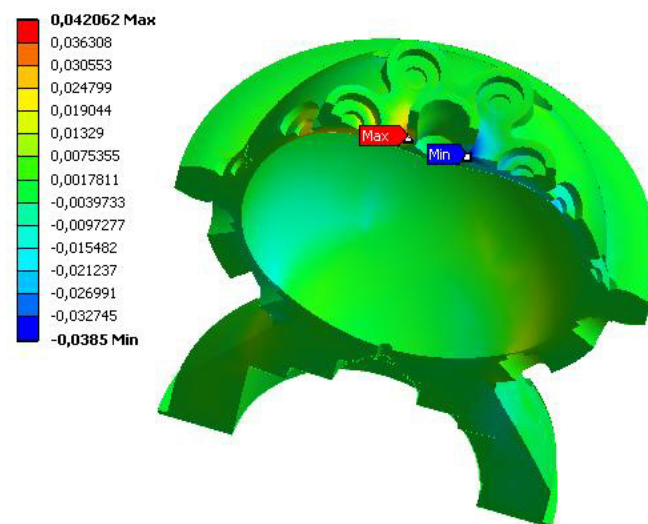
*Schubspannungen in XY-Ebene in  $\frac{N}{mm^2}$*



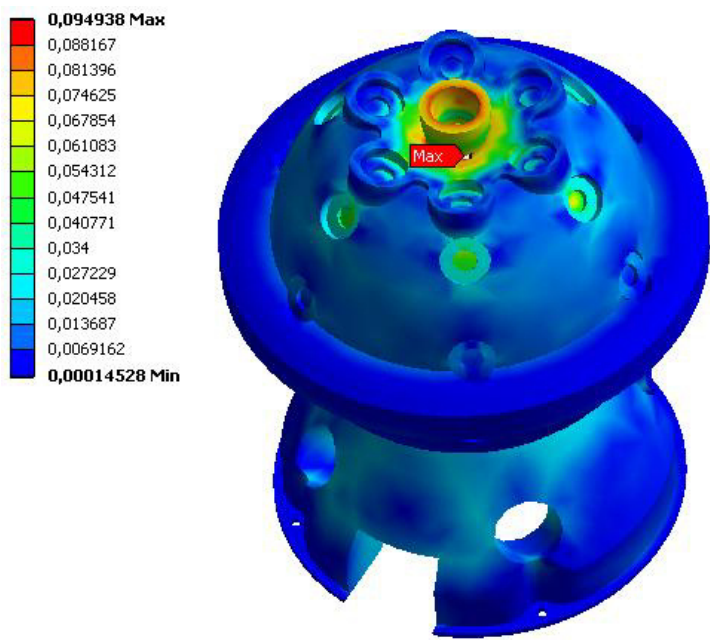
### Schubspannungen in XZ-Ebene in $\frac{N}{mm^2}$



### Schubspannungen in YZ-Ebene in $\frac{N}{mm^2}$



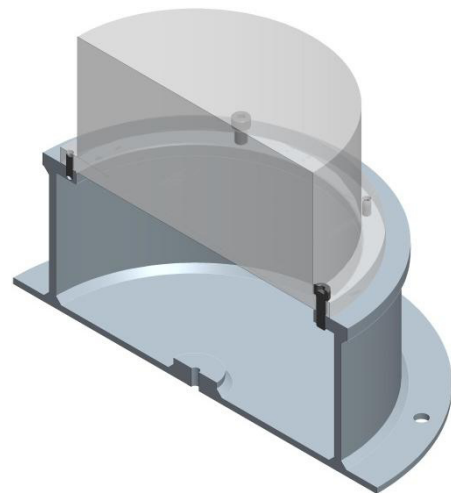
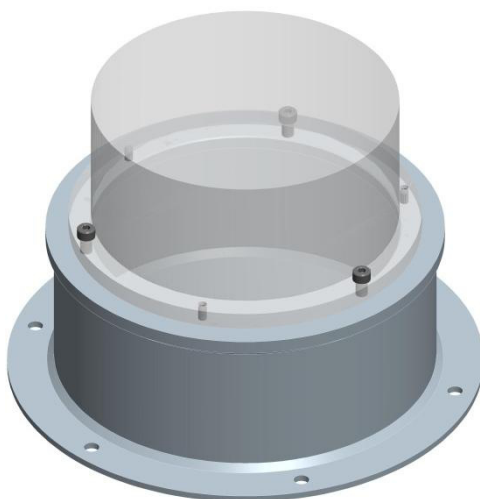
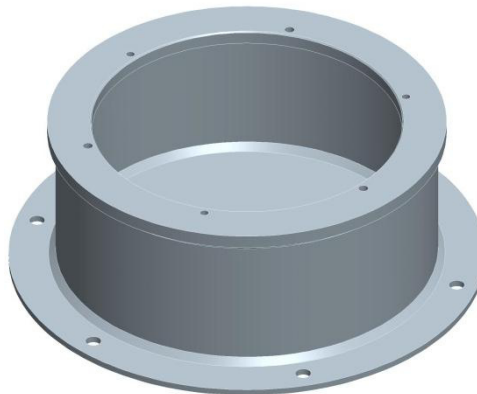
Von Mises Vergleichsspannungen in  $\frac{N}{mm^2}$



# Anlagen, Teil I

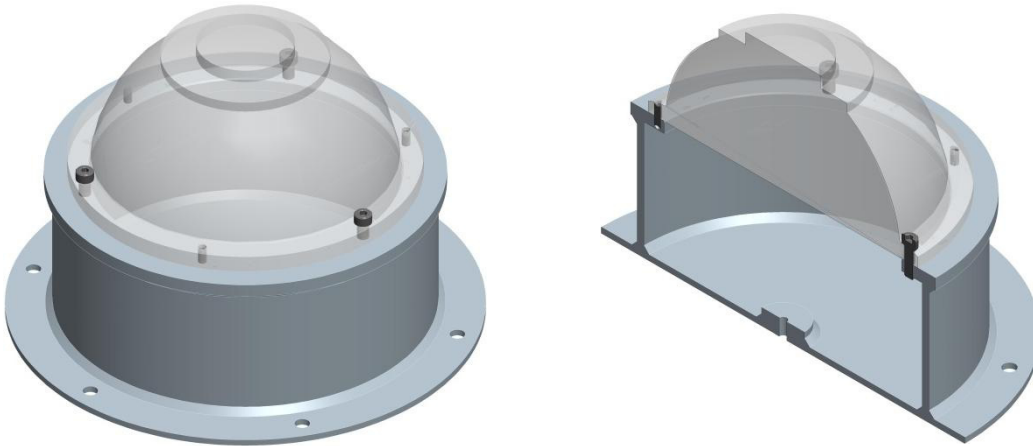
## ***Fertigungsablauf am Beispiel untere Halbschale***

1. Block spannen und vorbereiten (u. a. Positionen für Stifte und Schrauben freistellen)
2. Bohrungen für Stifte Ø6 mm und Verschraubung M8 Ø 9 mm
3. Block auf Halterung spannen

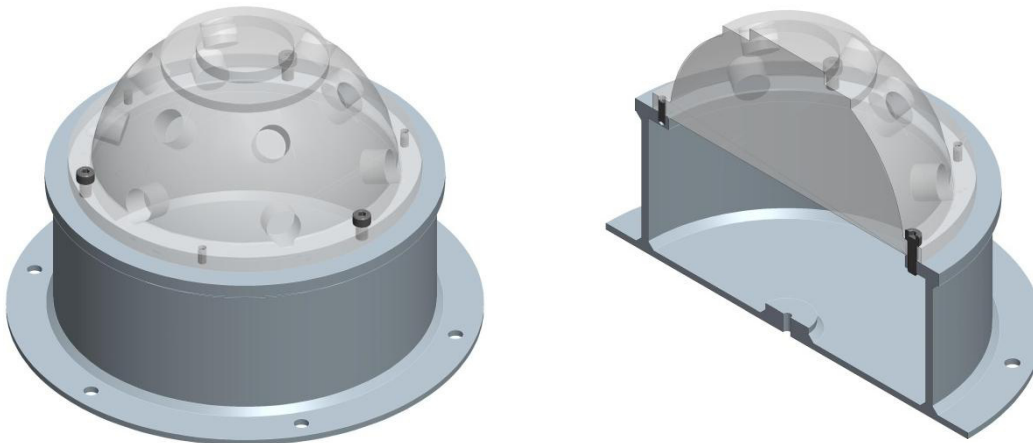




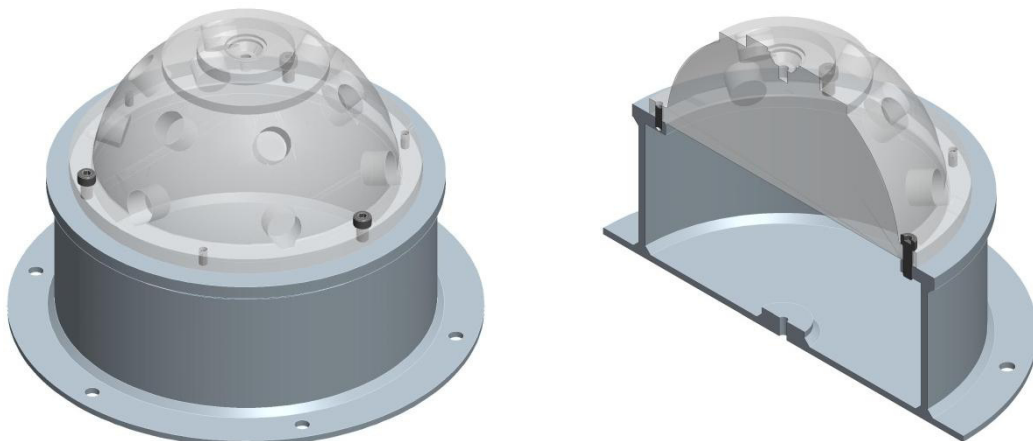
## 4. Außenkontur herstellen



## 5. Senkungen herstellen aber hinsichtlich der Tiefe unter Nennmaß bleiben

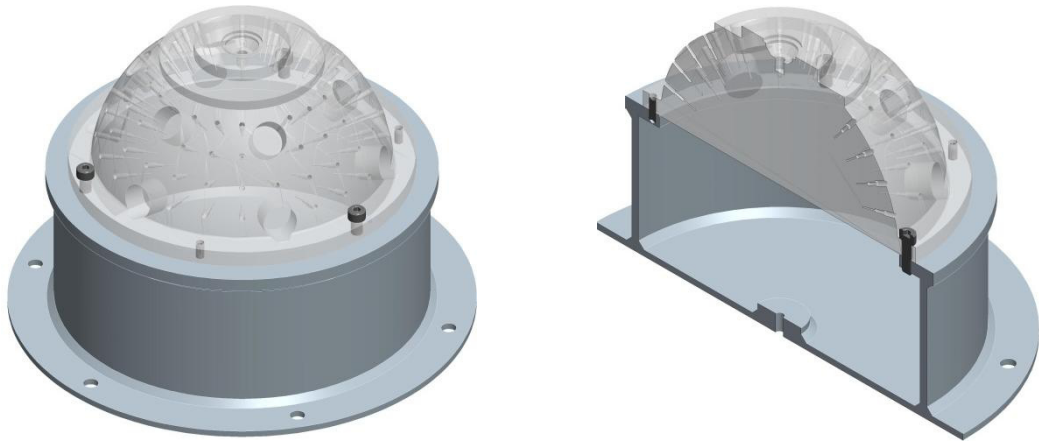


## 6. Durchgangsbohrung für Achse einbringen (Lage beachten, koaxial und rechtwinklig auf Trennfläche) und Abfluss einbringen

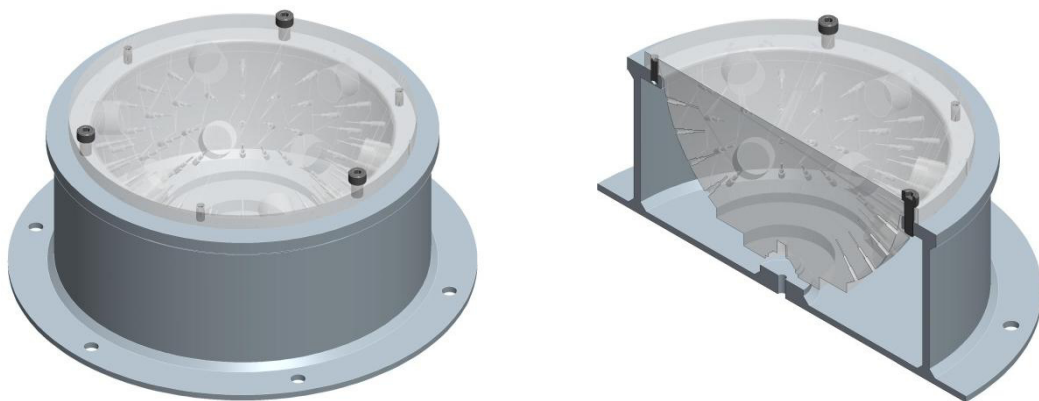




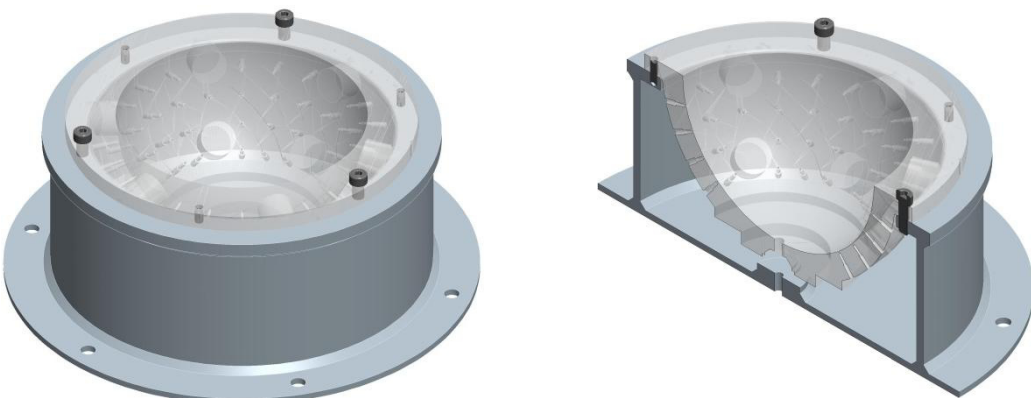
7. 1 mm Bohrung für Potentialmessspitzen sowie Kernloch für Gewinde M3 und äußere Senkung auf 4 mm einbringen (vor Bearbeitung der Innenkontur zwecks ausplatzen)
8. Kernlöcher M3 für Lagerhalterung unten einbringen



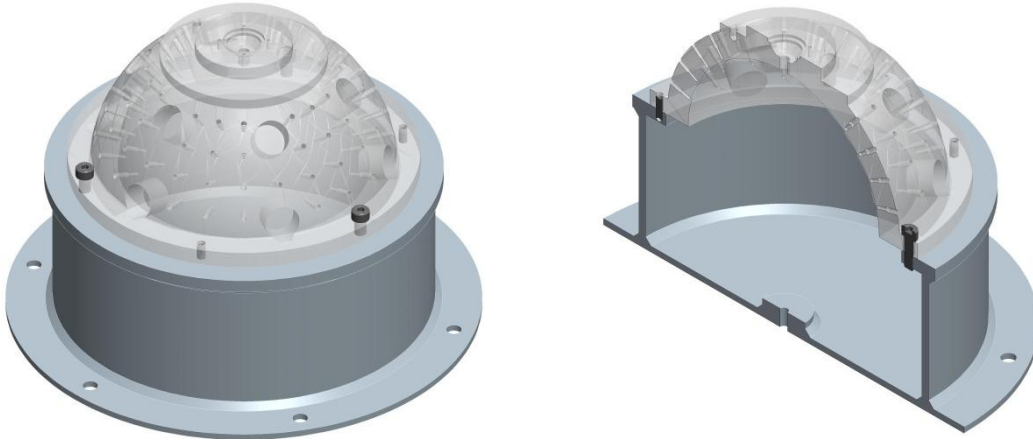
9. Werkstück umspannen zur Bearbeitung der Innenkontur



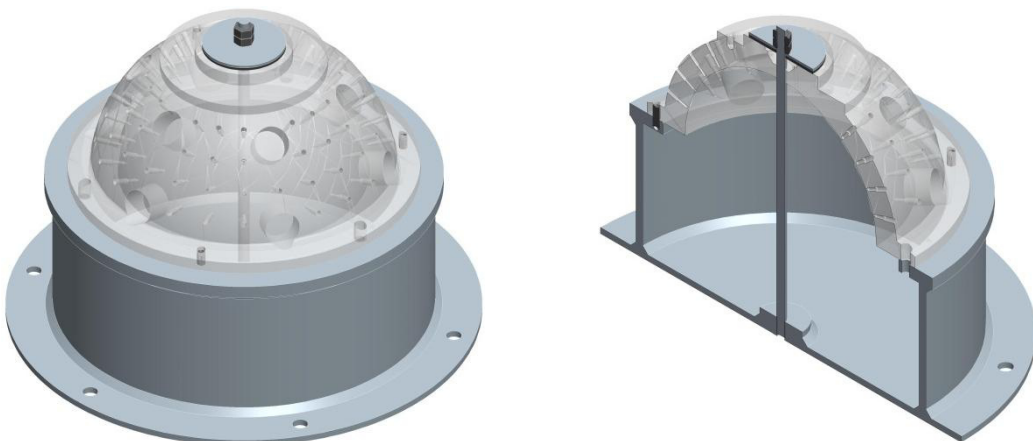
10. Innenkontur herstellen (unter Nennmaß bleiben)



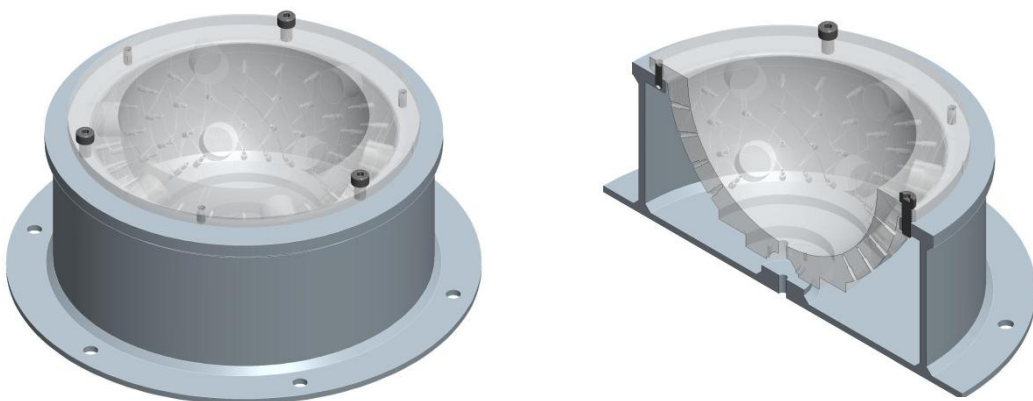
11. Werkstück lösen und im Ofen tempern
12. Werkstück wieder spannen für äußere Bearbeitung (Koaxialität prüfen)
13. Äußere Kontur nacharbeiten
14. Senkungen nacharbeiten und Kontaktflächen polieren
15. Gewinde für Potentialmessspitzen und Lagerhalterung unten einbringen



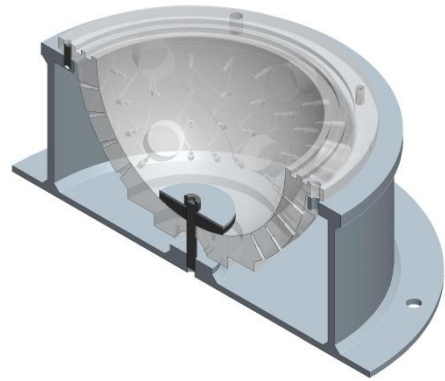
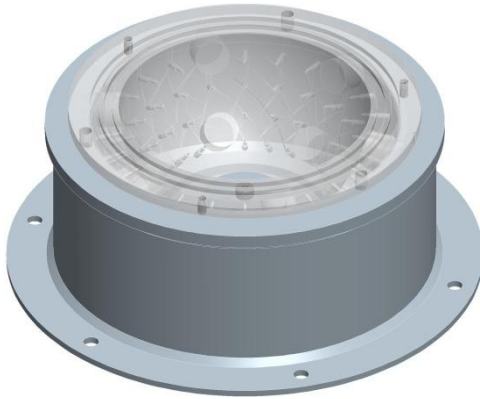
16. Werkstück mit anderem Spannmittel spannen
17. Fase Spannkette herstellen



18. Werkstück umspannen
19. Innenkontur nacharbeiten und polieren



- 20. Werkstück mit anderem Spannmittel spannen
- 21. Nuten einbringen
- 22. Trennfläche nacharbeiten

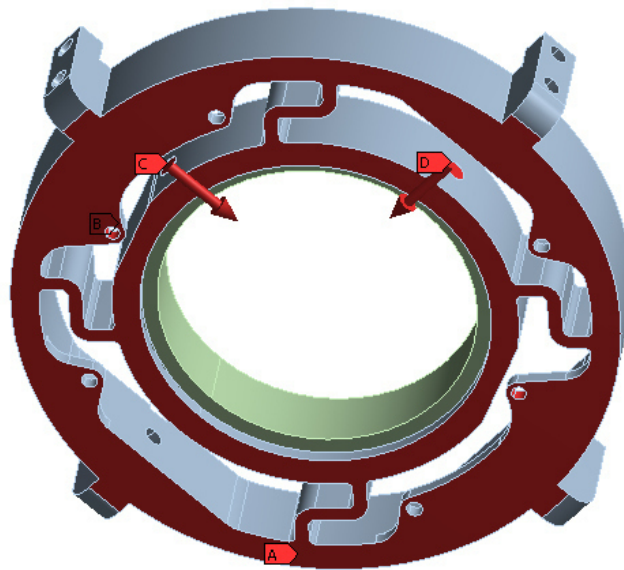


# Anlagen, Teil J

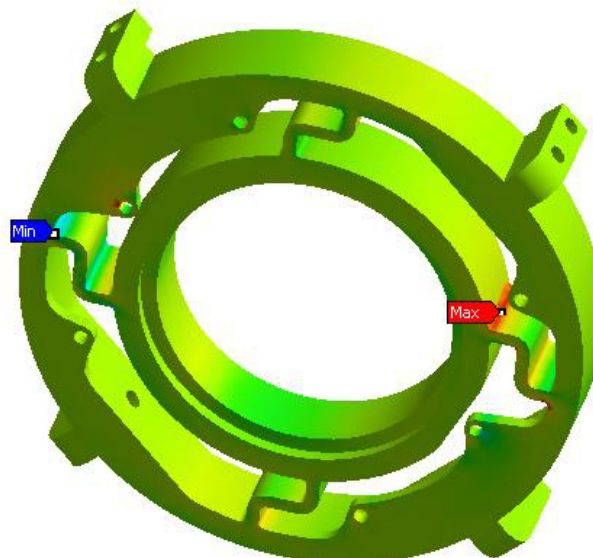
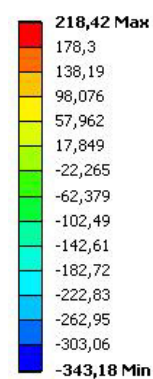
## Konturplots Neigungseinheit

### Randbedingungen

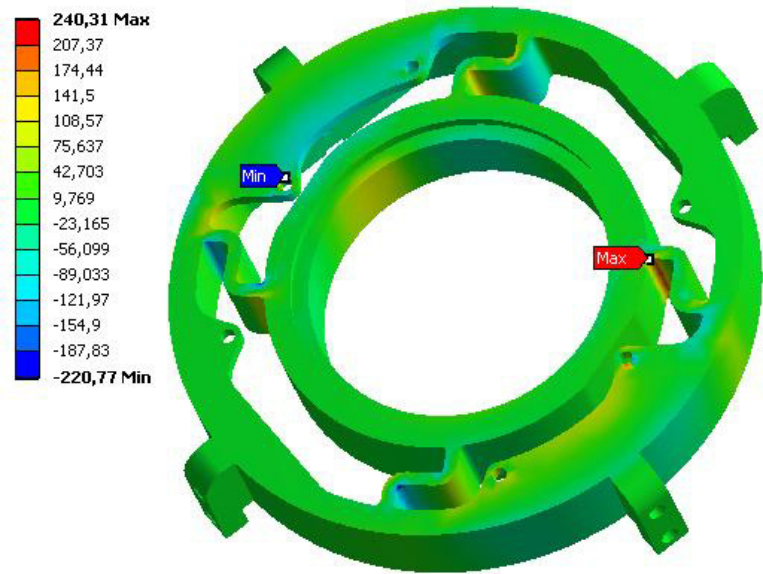
- A** Verschiebung
- B** Verschiebung 2
- C** Verschiebung 3
- D** Verschiebung 4



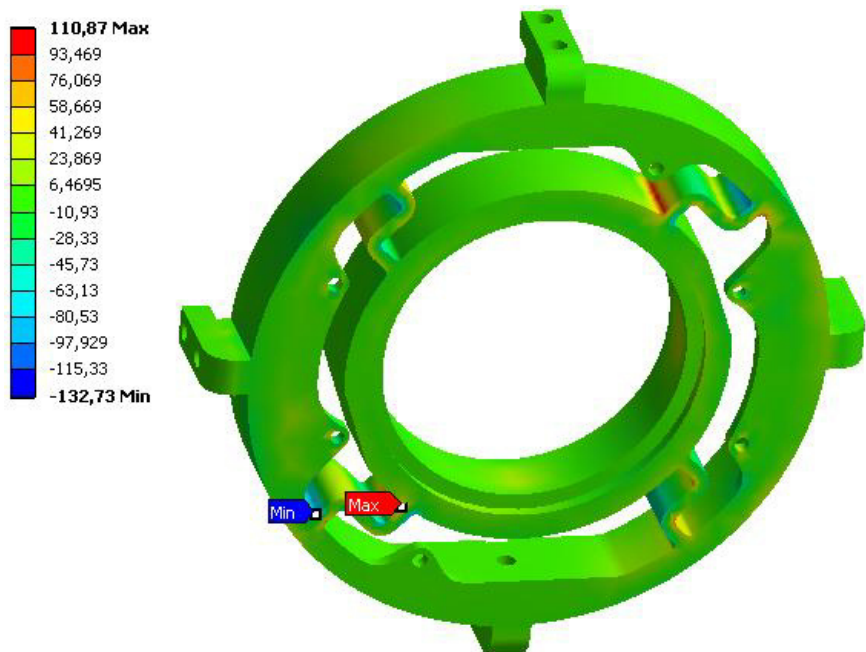
### Spannungen in X in $\frac{N}{mm^2}$

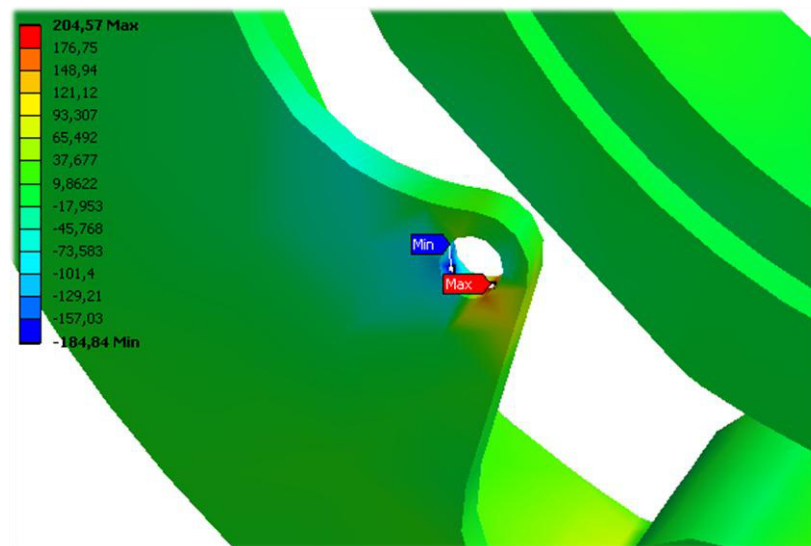
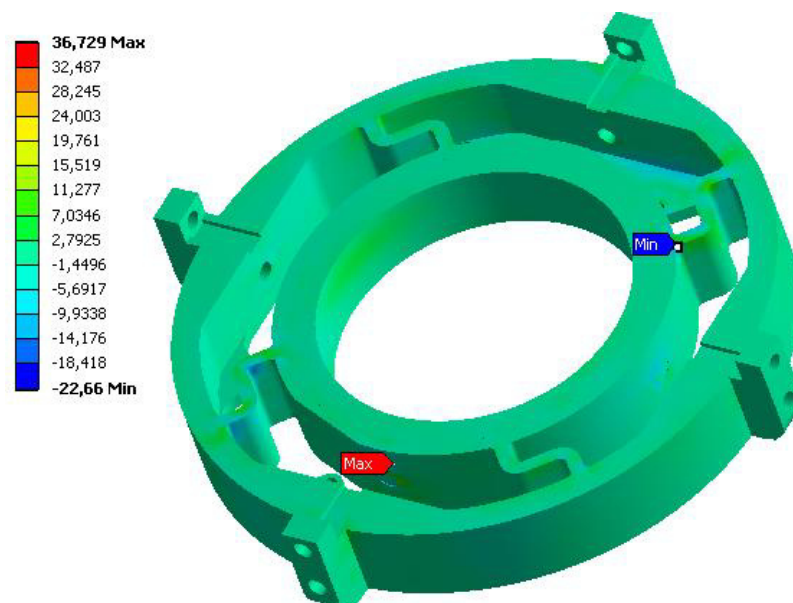


*Spannungen in Y in  $\frac{N}{mm^2}$*



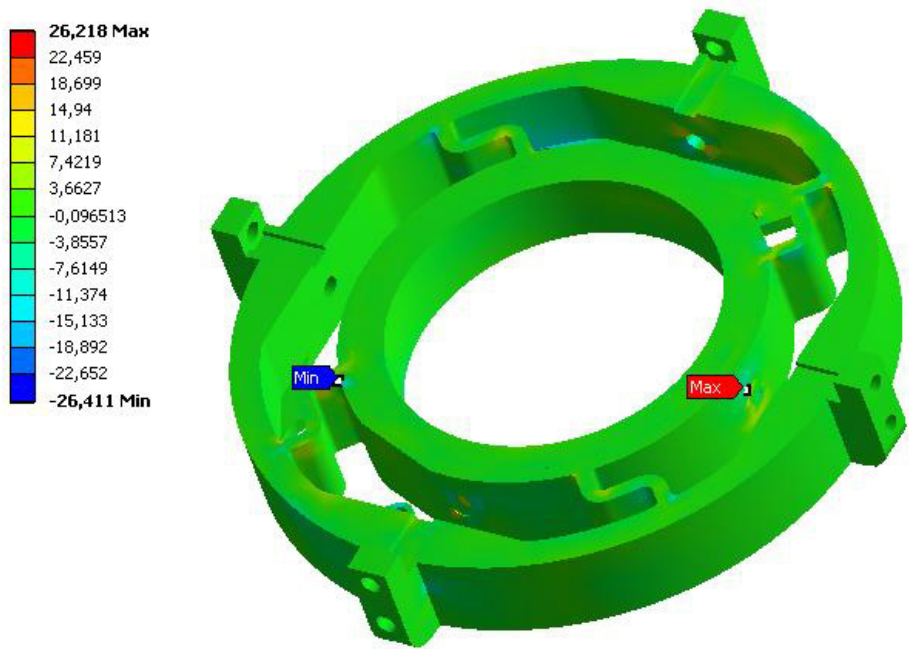
*Spannungen in Z in  $\frac{N}{mm^2}$*



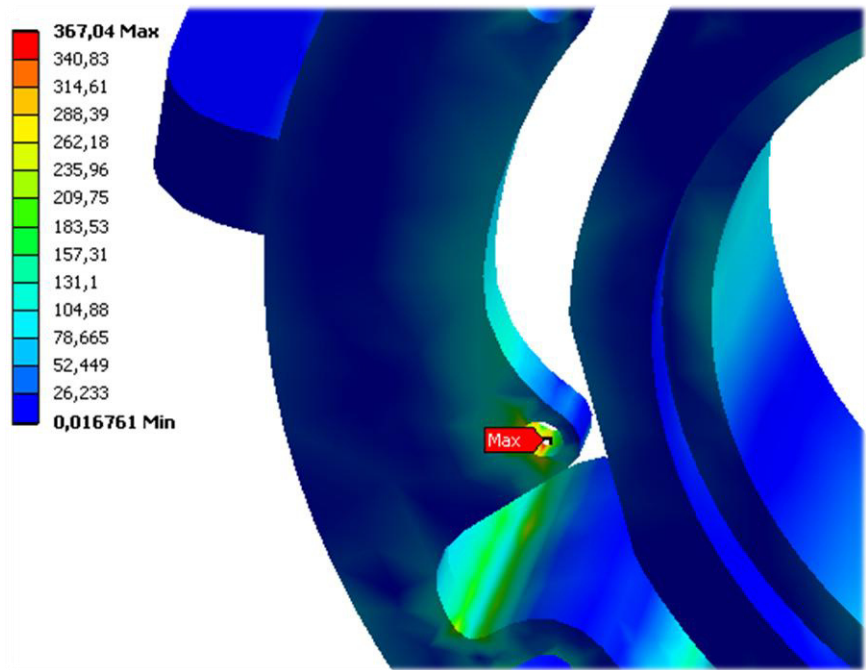
**Schubspannungen in XY-Ebene in  $\frac{N}{mm^2}$** **Schubspannungen in XZ-Ebene in  $\frac{N}{mm^2}$** 



*Schubspannungen in YZ-Ebene in  $\frac{N}{mm^2}$*



*Von Mises Vergleichsspannungen in  $\frac{N}{mm^2}$*



## Anlagen, Teil K

### ***Bestelllisten***

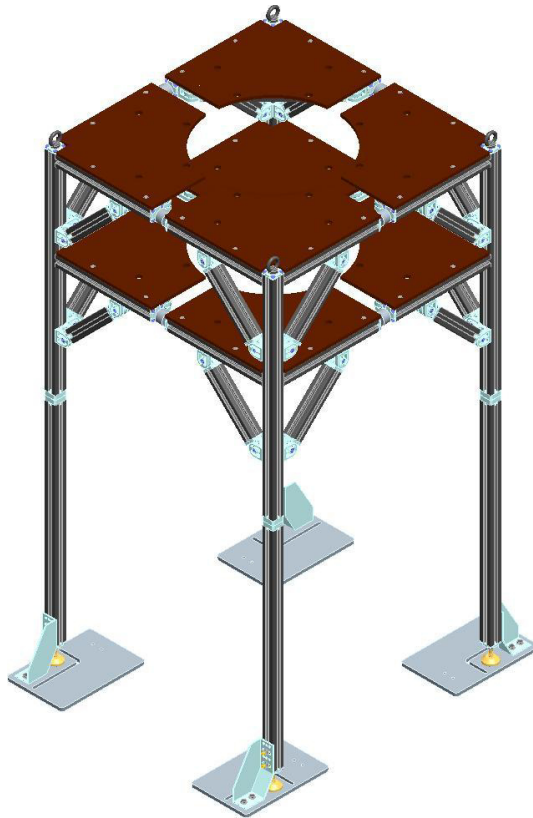
#### *Bestellliste Hansa-Flex*

Stck.	Bezeichnung	Artikel-Nr.
1x	Richtungsstellbares Winkelstück	EWOM NW 08 HL
2x	Verschraubung, Winkel 90°	NEW NW 08 HL VA
1x	Kugelhahn, 2 Wege, Serie 112	B3VH-10M-S316
1x	Pressnippel für Schlauchanschluss	PN 10 FL 08 VA
5x	Schneidring	SRD 10 VA
5x	Überwurfmutter	UEM NW 08 L VA
300x	O-Ring	OR3-1
1x	O-Ring	OR60-5
1x	O-Ring	OR80-5
1x	O-Ring	OR190-5
1x	O-Ring	OR210-5



Bestellliste diverses

Stck.	Bezeichnung	Hersteller	Artikel-Nr.	Stck.-Preis
10x	Axial-Lager	Conrad	214507 - 62	5,95 €
1x	Balgkupplung	ABP-Antriebe	BKBS 12203/03	-
500x	Schrauben für Sensorhalterung	Edelstahl-Schrauben	DIN 920 M3x4/K52092034	0,19 €
200x	Helicoils M3x3	Bierbach-Morgenstern	4000867009	0,14 €
10x	Metall-Gummipuffer	Mädler	68531128	1,92 €

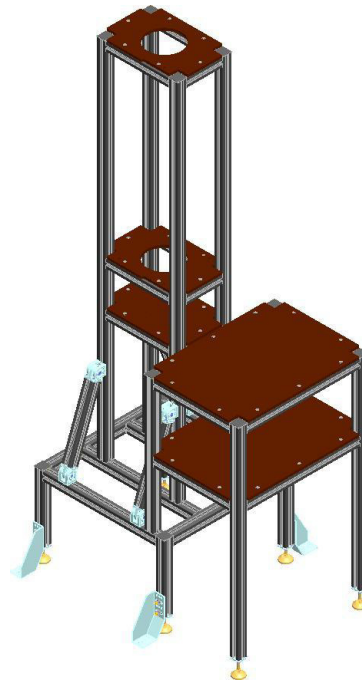
Bestellliste BLOCAN Profile+Zubehör bei Zacher-Component für äußeres Gestell**BLOCAN-Profillängen**

- Benötigtes Profil: BLOCAN S-40x40 (Art.-Nr.: 4D1500)
- Pulverbeschichtung: RAL 9006 oder RAL 7035

Anzahl	Länge [mm]
16x	205
16x	340
8x	357
8x	750

**Komponenten zur Montage**

Anzahl	Bezeichnung	Artikelnummer
2x	Fundamentwinkel rechts	4021301
2x	Fundamentwinkel links	4021300
16x	Spannbügelsatz	4016500
4x	Gelenkstellfuß	4016302
8x	Hammerschraube M8	4016201
48x	Profil-Gelenk	4015533
24x	Anschlussplatte M10 (Fuß)	4014403
4x	Anschlussplatte stirnseitig	4015452
75x	Abdeckprofil á 2 m	4008570
4x	Ringschraube	4000302

Bestellliste BLOCAN Profile+Zubehör bei Zacher-Component für inneres Gestell**BLOCAN-Profillängen**

- Benötigtes Profil: BLOCAN S-40x40 (Art.-Nr.: 4D1500)
- Pulverbeschichtung: RAL 9006 oder RAL 7035

Anzahl	Länge [mm]
6x	160
6x	280
8x	300
4x	340
10x	500
2x	600
2x	900
4x	1630

**Komponenten zur Montage**

Anzahl	Bezeichnung	Artikelnummer
2x	Fundamentwinkel rechts	4021301
2x	Fundamentwinkel links	4021300
58x	Spannbügelsatz	4016500
6x	Gelenkstellfuß	4016302
8x	Hammerschraube M8	4016201
8x	Profil-Gelenk	4015533
6x	Anschlussplatte M10 (Fuß)	4014403
12x	Abdeckkappe	4010421
100x	Nutenstein F mit Feder M6	4006714
5x	Halteblock für Kabel (Packung á 10 Stck.)	4018125

## **Anlagen, Teil L**

***Auszug aus dem Zeichnungssatz***







## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Dresden, den 14.12.2013

Benjamin Gohl